

TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI ANALISIS PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SST
SEBAGAI ALTERNATIF SUPLAI UNIT BUS BAR PADA
PLTU REMBANG**

Charisna Fidiansyah Putra
NRP 07111440000171

Dosen Pembimbing
Ir. Sjamsjul Anam, MT.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



TUGAS AKHIR - TE 141599

**STUDI ANALISIS PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SST
SEBAGAI ALTERNATIF SUPLAI UNIT BUS BAR PADA
PLTU REMBANG**

Charisna Fidiansyah Putra
NRP 07111440000171

Dosen Pembimbing
Ir. Sjamsjul Anam, MT.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTEMEN TEKNIK ELEKTRO
Fakultas Teknologi Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018



FINAL PROJECT - TE 141599

**STUDY ANALYSIS OF ADDITIONAL SST TRANSFORMER
AS AN ALTERNATIVE TO SUPPLY BUS BAR UNIT IN
REMBANG POWER PLANT**

Charisna Fidiansyah Putra
NRP 07111440000171

Advisor
Ir. Sjamsjul Anam, MT.
Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

DEPARTMENT OF ELECTRICAL ENGINEERING
Faculty of Electrical Technology
Institut Teknologi Sepuluh Nopember
Surabaya 2018

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR

Dengan ini saya menyatakan bahwa isi sebagian maupun keseluruhan Tugas Akhir saya dengan judul **“Studi Analisis Penambahan Transformator SST Sebagai Alternatif Suplai Unit Bus Bar Pada PLTU Rembang”** adalah benar hasil karya intelektual mandiri, diselesaikan tanpa menggunakan bahan-bahan yang tidak diijinkan dan bukan merupakan karya pihak lain yang saya akui sebagai karya sendiri.

Semua referensi yang dikutip maupun dirujuk telah ditulis secara lengkap pada daftar pustaka.

Apabila ternyata pernyataan ini tidak benar, saya bersedia menerima sanksi sesuai peraturan yang berlaku.

Surabaya, Juli 2018



Charisna Fidiansyah P.
NRP. 07111440000171

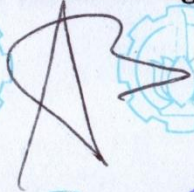
**STUDI ANALISIS PENAMBAHAN
TRANSFORMATOR SST SEBAGAI ALTERNATIF
SUPPLAI UNIT BUS BAR PADA PLTU REMBANG
TUGAS AKHIR**

**Diajukan Guna Memenuhi Sebagai Persyaratan
Untuk Memperoleh Gelar Sarjana Teknik
Pada**

**Bidang Teknik Sistem Tenaga
Departemen Teknik Elektro
Institut Teknologi Sepuluh Nopember**

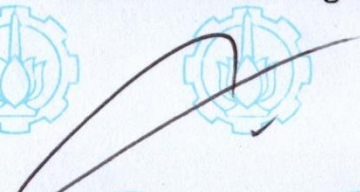
Menyetujui:

Dosen Pembimbing I



**Ir. Sjamsjul Anam, MT.
NIP 19630725 199003 1002**

Dosen Pembimbing II



**Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.
NIP 19551207 198003 1004**



STUDI ANALISIS PENAMBAHAN TRANSFORMATOR SST SEBAGAI ALTERNATIF SUPLAJ UNIT BUS BAR PADA PLTU REMBANG

Nama : Charisna Fidiansyah Putra
Pembimbing I : Ir. Sjamsjul Anam, MT.
Pembimbing II : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

ABSTRAK

PLTU Rembang adalah Pembangkit Listrik Tenaga Uap berkapasitas 2 x 315 MW yang dikelola oleh PT. PJB UBJOM yang merupakan anak perusahaan dari PT. PLN. Dalam memenuhi kebutuhan listrik terutama untuk konsumen di daerah Rembang dan Pati diharapkan PLTU Rembang bisa menjaga kualitas serta kontinuitas dalam hal menyuplai listrik. Namun jika terdapat transformator UAT (*Unit Auxilliary Transformer*) pada salah satu unit milik PLTU Rembang mati maka generator unit akan ikut mati sehingga menyebabkan berhentinya suplai listrik dari PLTU Rembang ke konsumen. Hal ini diakibatkan karena saat transformator UAT salah satu mati, transformator UAT yang lain tidak mampu *memback-up* beban dibawah transformator UAT yang mati tersebut. Hal ini dibuktikan dengan hasil *powerflow* pada sistem kelistrikan eksisting dimana saat transformator UAT unit 2 mati, transformator UAT unit 1 bekerja di rating 95,54% dari rating. Hal ini bisa dikategorikan transformator bekerja di fase kritis pembebanan.

Oleh karena itu dibutuhkan beberapa opsi untuk mengatasi hal tersebut. Dalam tugas akhir ini diambil opsi yakni penambahan transformator SST (*Station Service Transformer*) yang di suplai dari jaringan interkoneksi PLN yang akan disalurkan ke masing-masing unit bus bar. Keuntungan dari opsi ini adalah tidak mengganggu operasional dari unit yang lain. Transformator SST yang ditambahkan memiliki rating daya 30 MVA dihitung berdasarkan dari penghitungan jumlah suplai daya ke beban di satu unit. Setelah dilakukan berbagai studi analisis seperti *powerflow*, *starting motor*, serta *short circuit* yang berguna untuk menentukan koordinasi proteksi didapatkan hasil bahwa penambahan transformator SST untuk dipasang dalam sistem kelistrikan di PLTU Rembang layak untuk dilakukan.

Kata kunci : transformator SST, aliran daya, penyalan motor, hubung singkat, koordinasi proteksi

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

STUDY ANALYSIS OF ADDITIONAL SST TRANSFORMER AS AN ALTERNATIVE TO SUPPLY BUS BAR UNIT IN REMBANG POWER PLANT

Name : Charisna Fidiansyah Putra
Advisor I : Ir. Sjamsjul Anam, MT.
Advisor II : Dr. Ir. Soedibjo, M.MT.

ABSTRACT

Rembang Power Plant is a 2 x 315 MW Steam Power Plant operated by PT. PJB UBJOM which is a subsidiary of PT. PLN. In fulfilling the needs of electricity, especially for consumers in the area of Rembang and Pati expected Rembang power plant can maintain the quality and continuity in terms of supplying electricity. However, if there is a case where one of Unit Auxiliary Transformer (UAT) in Rembang power plant stopped working, the generator would stop working as well and that could lead to electricity termination. It would happen on account of the incapability of the other UATs to back up the load of the collapsed UAT. It is demonstrated as the power-flow showing the existing electricity was at 95.54% when UAT unit 2 collapsed. This evidence connotes that the transformers had worked at the critical phase of loading. This can be categorized as a transformer working in the critical phase of loading.

To overcome the problem that have been mentioned above, some options are needed. This study chooses one of the options that is to add transformer of SST (Service Station Transformer) supplied and transferred by PLN network interconnection to each busbar unit. The advantage of this option is that it does not interfere with the operations of the other units. The added SST transformer has a 30 MVA power rating measured regarding the power supply amount to one unit loading calculation. After a series of analytical studies such as powerflow, starting motor, and short circuit that is useful to determine the coordination of protection obtained result that the addition of SST transformer to be installed in the electrical system in Rembang power plant worth to do.

Keywords : SST transformer, powerflow, starting motor, short circuit, protection coordination

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kehadirat Allah SWT atas segala rahmat, karunia, dan petunjuk yang telah dilimpahkan-Nya sehingga penulis mampu menyelesaikan tugas akhir dengan judul **“Studi Analisis Penambahan Transformator SST Sebagai Alternatif Suplai Unit Bus Bar Pada PLTU Rembang”**.

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk menyelesaikan jenjang pendidikan S1 pada Bidang Studi Teknik Sistem Tenaga, Departemen Teknik Elektro, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember. Atas selesainya penyusunan tugas akhir ini, penulis mengucapkan terima kasih kepada:

1. Allah SWT atas limpahan rahmat, karunia, dan petunjuk-Nya.
2. Ibu dan Ayah, serta Saudara dari penulis atas doa dan cinta yang tak henti pada penulis dalam keadaan apapun. Semoga Allah SWT senantiasa melindungi dan memberi mereka tempat terbaik kelak di surga-Nya.
3. Ir. Sjamsjul Anam, MT dan Dr. Ir. Soedibjo, M.MT. selaku dosen pembimbing yang telah memberikan arahan, bimbingan, dan perhatiannya selama proses penyelesaian tugas akhir ini.
4. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Elektro ITS yang telah memberikan banyak ilmu dan menciptakan suasana belajar yang luar biasa.
5. Teman-teman e54 yang telah berjuang bersama-sama mulai maba sampai sekarang ini.
6. Yolla Fara Ardwita yang telah selalu support dan menemani sejak awal pengerjaan tugas akhir ini.

Penulis telah berusaha maksimal dalam penyusunan tugas akhir ini. Namun tetap besar harapan penulis untuk menerima saran dan kritik untuk perbaikan dan pengembangan tugas akhir ini. Semoga tugas akhir ini dapat memberikan manfaat yang luas.

Surabaya, Juli 2018

Charisna Fidiansyah P.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

DAFTAR ISI

PERNYATAAN KEASLIAN TUGAS AKHIR	v
LEMBARPENGESAHAN	vii
ABSTRAK	ix
ABSTRACT	xi
KATA PENGANTAR	xiii
DAFTAR ISI	xv
DAFTAR GAMBAR	xvii
DAFTAR TABEL	xix
 BAB 1 PENDAHULUAN	 1
1.1 Latar Belakang	1
1.2 Perumusan Masalah	2
1.3 Tujuan Penelitian	2
1.4 Batasan Masalah	3
1.5 Metodologi	3
1.6 Sistematika Penulisan	4
1.7 Relevansi	5
 BAB 2 TINJAUAN PUSTAKA	 7
2.1 Transformator	7
2.1.1 <i>Station Service Transformer</i>	7
2.2 Bus Bar	8
2.3 Studi Aliran Daya Listrik	8
2.3.1 Konsep Daya Listrik	10
2.3.2 Rugi – Rugi Daya	11
2.4 Drop Tegangan	12
2.5 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik	13
2.5.1 Gangguan Beban Lebih	14
2.5.2 Gangguan Hubung Singkat	14
2.6 Rele Arus Lebih	17
2.6.1 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (<i>Inverse</i>)	18
2.6.2 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (<i>Instantaneous</i>)	20
2.6.3 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (<i>Definite</i>)	20
2.6.4 Koordinasi Rele	21

BAB 3 SISTEM KELISTRIKAN PLTU REMBANG	23
3.1 Seputar Tentang PLTU Rembang	23
3.2 Sistem Kelistrikan PLTU Rembang	23
3.3 Kapasitas Pembangkitan.....	25
3.4 Sistem Distribusi PLTU Rembang	25
3.5 Data Beban pada PLTU Rembang	26
3.6 Sistem Pengaman Arus Lebih	29
 BAB 4 HASIL SIMULASI DAN ANALISIS STUDI PADA PLTU REMBANG	 31
4.1 Analisa Aliran Daya Pada Eksisting PLTU Rembang	31
4.1.1 Analisa Aliran Daya saat Kondisi Normal	31
4.1.2 Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	34
4.1.3 Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	35
4.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU Rembang	37
4.2.1 Pemilihan Transformator SST	37
4.3 Analisis Aliran Daya	40
4.3.1 Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	40
4.3.2 Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	42
4.4 Analisis <i>Starting Motor</i>	44
4.4.1 Analisis <i>Starting Motor</i> saat Unit 1 disuplai oleh Grid melewati Transformator SST	45
4.4.2 Analisis <i>Starting Motor</i> saat Unit 2 disuplai oleh Grid melewati Transformator SST	46
4.5 Analisis Hubung Singkat	47
4.5.1 Analisis Hubung Singkat Maksimum.....	47
4.5.2 Analisis Hubung Singkat Minimum.....	49
4.6 Perancangan Sistem Koordinasi Proteksi	50
4.6.1 Pemilihan Tipikal Koordinasi pada PLTU Rembang	50
4.6.2 Koordinasi Rele Arus Lebih	53
BAB 5 KESIMPULAN DAN SARAN	79
5.1 Kesimpulan	79
5.2 Saran	79
DAFTAR PUSTAKA	81
BIOGRAFI PENULIS	83

DAFTAR GAMBAR

Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana	9
Gambar 2.2 Segitiga Daya.....	11
Gambar 2.3 Pemodelan saluran untuk perhitungan rugi-rugi daya	11
Gambar 2.4 Hubung Singkat Tiga Fasa	14
Gambar 2.5 Hubung Singkat Dua Fasa.....	15
Gambar 2.6 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah.....	16
Gambar 2.7 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah	17
Gambar 2.8 <i>Standard Inverse, Very Inverse, dan Extremely Inverse</i> ..	18
Gambar 2.9 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika	20
Gambar 2.10 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu.....	21
Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan <i>Existing</i> PLTU Rembang	24
Gambar 4.1 Hasil Analisis Aliran Daya Unit 1 saat Operasi Normal	32
Gambar 4.2 Hasil Analisis Aliran Daya Unit 2 saat Operasi Normal	33
Gambar 4.3 Hasil Analisa Aliran Daya saat Transformer UAT 2 <i>off</i>	34
Gambar 4.4 Hasil Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	36
Gambar 4.5 Sistem Kelistrikan Terbaru PLTU Rembang	39
Gambar 4.6 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	41
Gambar 4.7 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	43
Gambar 4.8 Grafik Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 1.....	45
Gambar 4.9 Grafik Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 2.....	46
Gambar 4.10 Tipikal Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa PLTU Rembang.....	52
Gambar 4.11 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 1	54
Gambar 4.12 Plot TCC Tipikal 1	66
Gambar 4.13 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 2	67
Gambar 4.14 Plot TCC Tipikal 2.....	69
Gambar 4.15 <i>Single Line Diagram</i> Tipikal 3	70
Gambar 4.16 Plot TCC Tipikal 3.....	72

Gambar 4.17 *Single Line Diagram* Tipikal 4.....73

Gambar 4.18 Plot TCC Tipikal 478

DAFTAR TABEL

Tabel 2.1 Klasifikasi Tegangan berdasarkan Standar IEEE 1159 – 1995.....	12
Tabel 2.2 Koefisien Invers <i>Time Dial</i>	20
Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkitan di PLTU Rembang	25
Tabel 3.2 Data Bus di PLTU Rembang	25
Tabel 3.3 Data Transformator UAT PLTU Rembang	26
Tabel 3.4 Data Beban PLTU Rembang	26
Tabel 3.5 Spesifikasi Rele Arus Lebih.....	29
Tabel 4.1 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 1 PLTU Rembang pada kondisi Normal.....	32
Tabel 4.2 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 2 PLTU Rembang pada kondisi Normal.....	33
Tabel 4.3 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 1 PLTU Rembang pada saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	34
Tabel 4.4 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 2 PLTU Rembang pada saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	36
Tabel 4.5 Spesifikasi Transformator SST	38
Tabel 4.6 Spesifikasi Kabel.....	38
Tabel 4.7 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 <i>off</i> .	41
Tabel 4.8 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 <i>off</i> .	43
Tabel 4.9 Spesifikasi Motor BFP-1B dan BFP-2A	44
Tabel 4.10 Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 1	45
Tabel 4.11 Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 2	46
Tabel 4.12 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 4 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	48
Tabel 4.13 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 4 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	48
Tabel 4.14 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 30 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	48
Tabel 4.15 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 30 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	49
Tabel 4.16 Data Arus Hubung Singkat Minimum 30 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 1 <i>off</i>	49
Tabel 4.17 Data Arus Hubung Singkat Minimum 30 <i>cycle</i> saat Transformator UAT 2 <i>off</i>	50

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 1

PENDAHULUAN

1.1 Latar Belakang

Pada jaman sekarang, ketersediaan pasokan listrik sangat penting adanya. Karena listrik sudah menjadi objek vital yang harus ada untuk mendukung segala kebutuhan manusia. Tentunya masyarakat juga menginginkan energi listrik yang berkualitas serta memiliki mutu yang baik agar tidak mengganggu kebutuhan serta aktivitas mereka. Jika pasokan listrik terhenti walaupun hanya dalam hitungan jam, dapat dibayangkan aktivitas masyarakat yang membutuhkan ketersediaan listrik akan terganggu. Begitu pula yang terjadi di Pembangkit Listrik Tenaga Uap Rembang.

Pada saat salah satu transformator UAT milik PLTU Rembang bermasalah maka generator unit akan ikut mati sehingga menyebabkan berhentinya suplai listrik dari PLTU Rembang ke konsumen khususnya konsumen di daerah Rembang dan Pati. Permasalahan ini disebabkan karena tidak adanya suplai listrik ke peralatan pemakaian sendiri akibat dari matinya transformator UAT tersebut. Kemudian dari permasalahan ini juga dapat menyebabkan adanya kerugian yang sangat besar yang ditanggung oleh pihak PT. PJB UBJOM sebagai pengelola PLTU Rembang yang merupakan anak perusahaan dari PT. PLN. Jumlah kerugian yang akan ditanggung pun akan berbanding lurus dengan lamanya pembangkit tersebut untuk kembali ke posisi siap untuk menyuplai listrik kembali. Dengan demikian semakin lama waktu maka semakin besar pula kerugian yang dialami.

Untuk mengatasi hal tersebut dapat dilakukan beberapa opsi. Opsi pertama yakni pemasangan *bus duct*. Pemasangan *bus duct* ini dilakukan untuk menyambungkan antara unit 1 dan unit 2 namun tetap dalam kondisi *stand by*. Oleh karena itu jikalau transformator UAT pada unit 1 bermasalah maka suplai bus bar pada unit 1 akan disuplai langsung dari unit 2. Namun opsi ini memiliki kekurangan yakni jika terjadi masalah pada salah satu unit maka unit yang lain operasinya akan terganggu akibat penambahan yang ditanggungkan oleh unit tersebut.

Opsi yang kedua dengan penambahan transformator *Station Service Transformer* yang akan disambungkan pada masing-masing unit bus bar. Penambahan ini dilakukan untuk menyuplai unit bus bar apabila terjadi gangguan yang menyebabkan terhentinya suplai ke bus bar.

Selain itu keunggulan dari opsi ini yakni tidak mengganggu operasi dari unit satunya karena sudah diantisipasi oleh transformator SST.

Pada tugas akhir ini akan dibahas studi analisis mengenai opsi yang kedua yakni penambahan transformator SST yang akan disambungkan pada masing-masing unit bus bar untuk mengatasi masalah yang terjadi pada PLTU Rembang. Studi analisis ini meliputi analisis *Powerflow* untuk mengetahui bagaimana kondisi suatu sistem tersebut seperti tegangan, daya aktif dan reaktif, dan arus sekaligus rugi-rugi daya setelah dilakukan pemasangan transformator SST, *Starting Motor* untuk mengukur serta melihat drop tegangan yang terjadi pada saat salah satu beban *starting* saat transformator SST sepenuhnya suplai ke salah satu unit, dan *Short Circuit* untuk mengetahui arus hubung singkat yang berguna untuk menentukan sistem koordinasi proteksi dengan baik dan aman.

1.2 Perumusan Masalah

Berdasarkan uraian latar belakang, hal yang menjadi permasalahan dan akan dibahas dalam penelitian ini adalah

1. Bagaimana pengaruh terhadap aliran daya saat salah satu transformator UAT *off* dengan sistem eksisting?
2. Bagaimana pengaruh penambahan Transformator SST terhadap level tegangan, faktor daya, daya aktif dan reaktif, serta arus dan rugi-rugi daya?
3. Bagaimana pengaruh level tegangan yang terjadi pada tiap bus akibat adanya penyalan motor saat penambahan transformator SST?
4. Bagaimana setting proteksi yang baik pada jaringan transformator SST dengan mempertimbangkan arus hubung singkat pada tiap bus?

1.3 Tujuan Penelitian

Tujuan yang ingin dicapai dalam tugas akhir ini antara lain:

1. Mengetahui perubahan aliran daya saat salah satu transformator UAT *off* dengan sistem eksisting.
2. Mengetahui perubahan level tegangan, faktor daya, daya aktif dan reaktif, serta arus dan rugi-rugi daya akibat adanya penambahan transformator SST.

3. Mengetahui pengaruh level tegangan yang terjadi pada tiap bus akibat adanya penyalan motor saat penambahan transformator SST.
4. Mengetahui setting proteksi yang baik pada jaringan transformator SST.

1.4 Batasan Masalah

Batasan masalah pada tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi analisis yang dibahas dalam pemasangan transformator SST hanya dilakukan pada saat salah satu transformator UAT unit *off*.
2. Data yang digunakan termasuk dalam golongan data sekunder.
3. Beberapa parameter motor disamakan dengan beberapa data yang sudah ada.
4. Perancangan sistem proteksi yang dilakukan hanya sebatas memakai rele *overcurrent* antar fasa.

1.5 Metodologi

Metodologi yang digunakan dalam menyusun penelitian tugas akhir ini adalah sebagai berikut :

1. Studi Pustaka

Studi Pustaka yang dilakukan yaitu mengenai sistem pengoperasian dan sistem kelistrikan PLTU Rembang, modul *Powerflow*, modul *Starting Motor*, modul *Short Circuit* beserta sistem koordinasi proteksi, dan pemodelan menggunakan perangkat lunak ETAP.

2. Pengambilan Data

Pada tahap ini akan ditentukan terlebih dahulu sistem yang akan digunakan untuk menguji yang kemudian didapatkan data-data yang digunakan untuk analisa *Powerflow*, analisa *Starting Motor*, dan analisa *Short Circuit*. Data-data tersebut berupa *Single Line Diagram* (SLD), data pembangkitan, dan data beban peralatan.

3. Persiapan dan Pemodelan Sistem

Pada tahap ini setelah didapatkan data- data untuk keperluan simulasi, maka tahap selanjutnya yakni mempersiapkan permodelan sistem kelistrikan PLTU Rembang. *Software* yang digunakan yakni *software* ETAP 12.6.0. Dimasukkan semua data-data tersebut ke dalam pemodelan sistem. Pemodelan ini dilakukan

akan terus dilakukan hingga mendapatkan pemodelan yang benar dan tepat guna memperoleh hasil data yang valid.

4. Simulasi dan Pengambilan Hasil Data

Tahap ini setelah didapatkan pemodelan yang benar dan tepat kemudian dilakukan simulasi. Terdapat 3 simulasi analisis yakni simulasi *powerflow*, *starting motor*, dan *short circuit*. Pertama dilakukan simulasi *powerflow*. Hasil dari *powerflow* ini digunakan untuk simulasi dan analisis lebih lanjut yakni *starting motor*, dan *short circuit*. Hasil dari 3 simulasi ini didapatkan beberapa data yang kemudian digunakan untuk analisis lebih lanjut.

5. Analisis Data

Pada tahap ini data yang telah diperoleh dari hasil simulasi selanjutnya diolah dan dianalisis sesuai simulasinya. Untuk simulasi *powerflow* dianalisis perihal tegangan tiap bus, arus, dan daya pada pembangkit serta rugi-rugi daya. Untuk simulasi *starting motor* dianalisis perihal besarnya drop tegangan. Dan kemudian untuk simulasi *short circuit* dianalisis perihal besarnya nilai arus hubung singkat yang nantinya digunakan untuk menyetting sistem koordinasi proteksi.

6. Penarikan Kesimpulan

Dari hasil analisis data yang telah diolah, dapat ditarik kesimpulan mengenai kelayakan pengambilan opsi penambahan Transformator SST pada sistem kelistrikan PLTU Rembang berdasarkan berbagai studi analisis yang telah dipaparkan sebelumnya.

1.6 Sistematika Penulisan

Sistematika penulisan dalam tugas akhir ini terdiri atas lima bab dengan uraian sebagai berikut :

Bab 1 : Pendahuluan

Bab ini membahas tentang penjelasan mengenai latar belakang, permasalahan, tujuan, batasan masalah, metodologi penelitian, sistematika penulisan, dan relevansi.

Bab 2 : Tinjauan Pustaka

Bab ini membahas tentang dasar teori yang digunakan untuk menunjang penyusunan tugas akhir ini. Seperti mengenai transformator, bus bar, studi aliran daya listrik, drop tegangan, gangguan pada sistem tenaga listrik, dan rele arus lebih.

- Bab 3 : Perancangan dan Pemodelan
Bab ini membahas tentang bagaimana sistem kelistrikan yang digunakan di PLTU Rembang, serta data-data peralatan yang digunakan seperti data pembangkitan, data transformator, serta data beban.
- Bab 4 : Simulasi dan Analisis
Bab ini membahas tentang hasil simulasi dan analisa dari sistem kelistrikan baru di PLTU Rembang seperti analisa *powerflow*, *starting motor*, dan *short circuit* untuk menentukan koordinasi proteksinya.
- Bab 5 : Penutup
Bab ini berisi tentang kesimpulan dan saran dari hasil pembahasan yang telah dilakukan.

1.7 Relevansi

Hasil yang diperoleh dari tugas akhir ini diharapkan dapat memberi manfaat sebagai berikut:

1. Menjadi bahan masukan bagi pihak pengelola Pembangkit Listrik Tenaga Uap Rembang dalam mengatasi permasalahan yang terjadi saat salah satu transformator UAT *off*.
2. Menjadi bahan studi dan referensi mengenai penambahan transformator khususnya transformator SST bagi mahasiswa yang akan mengerjakan Tugas Akhir atau sejenisnya dengan permasalahan yang sama.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 2

TINJAUAN PUSTAKA

2.1 Transformator

Transformator merupakan suatu alat listrik yang berfungsi menyalurkan daya listrik dari tegangan yang tinggi ke tegangan yang rendah atau sebaliknya. Atau bisa juga dikatakan sebagai pengubah tegangan arus bolak-balik dari satu tingkat tegangan ke tingkat tegangan yang lainnya berdasarkan prinsip induksi elektromagnetik.

Pada dasarnya sebuah transformator terdiri dari dua lilitan atau kumparan kawat yaitu kumparan primer dan kumparan sekunder. Kumparan kawat tersebut dililitkan pada sebuah inti besi (*core*). Prinsip kerja dari transformator menganut pada teori apabila ada arus listrik bolak-balik yang mengalir mengelilingi suatu inti besi maka inti besi itu akan berubah menjadi magnet dan apabila magnet tersebut dikelilingi oleh suatu belitan maka pada kedua ujung belitan tersebut akan terjadi beda tegangan mengelilingi magnet, sehingga timbul GGL (Gaya Gerak Listrik) [1]. Saat kumparan pada sisi primer pada trafo dihubungkan dengan suatu sumber tegangan bolak-balik, maka akan mengalir arus bolak-balik pada kumparan tersebut. Dari arus bolak-balik ini akan menimbulkan fluks magnetik yang sefasa yang kemudian mengalir bersama pada inti trafo dari kumparan primer menuju kumparan sekunder sehingga akan membangkitkan tegangan induksi pada sisi sekunder transformator.

Berdasarkan fungsinya terdapat beberapa jenis transformator khususnya transformator tenaga yakni *Generator Transformer (GT)*, *Unit Service Transformer (UST)*, *Station Service Transformer (SST)*, dan *Unit Auxilliary Transformer (UAT)*. Namun pada tugas akhir ini akan dibahas mengenai transformator jenis *Station Service Transformer*.

2.1.1 Station Service Transformer

Station Service Transformer (SST) adalah transformator jenis *step down* yang berfungsi untuk melayani beban-beban dari sistem kelistrikan pemakaian sendiri dalam satu kesatuan unit. Beban-beban yang dilayani merupakan beban-beban yang esensial atau yang tidak boleh berhenti beroperasi. Suplai daya listrik yang dibutuhkan transformator SST ini diambil dari jaringan interkoneksi yang biasanya

terinterkoneksi oleh PLN dengan tegangan jala-jala 150 kV [2]. Biasanya transformator SST ini digunakan saat menyalakan unit pembangkit untuk pertama kalinya atau saat *start up*.

2.2 Bus Bar

Bus Bar merupakan titik pertemuan atau hubungan berbagai macam peralatan tenaga listrik contohnya transformator tenaga, saluran udara, saluran kabel, atau peralatan listrik lainnya yang berfungsi untuk menerima dan menyalurkan energi listrik. Bus bar ini memiliki konstruksi berupa susunan konduktor yang biasanya berupa aluminium atau plat tembaga berbentuk persegi panjang ataupun juga berbentuk tabung dengan ukuran yang cukup tebal.

2.3 Studi Aliran Daya Listrik

Sistem tenaga listrik merupakan sebuah sistem yang mengatur, membangkitkan, menyalurkan, dan membagi yang pada akhirnya dapat dimanfaatkan tenaga listrik tersebut. Ciri-ciri sistem tenaga listrik yang ideal adalah jika daya yang dibangkitkan oleh pembangkit sesuai dengan daya yang dibutuhkan sistem. Suatu sistem kelistrikan pada kenyataannya terdiri dari banyak bus yang terhubung satu sama lain sehingga dibutuhkan studi aliran daya listrik untuk mendasari analisis lebih lanjut pada sistem tenaga.

Studi aliran daya merupakan penentuan atau perhitungan tegangan, arus, daya aktif maupun daya reaktif yang terdapat pada berbagai titik dalam suatu jaringan tenaga listrik pada keadaan operasi normal, baik yang sedang berjalan maupun yang diharapkan akan terjadi di masa yang akan datang.

Dari analisis aliran daya akan mendapatkan parameter dasar dari sebuah sistem seperti tegangan bus, arus saluran, daya beban, faktor daya, hingga rugi-rugi daya. Parameter-parameter tersebut merupakan informasi yang penting untuk dapat mengevaluasi kondisi dan kualitas suatu sistem seperti peralatan, saluran, beban, maupun pembangkitan sehingga diperlukan sebagai dasar dalam melakukan perbaikan dan perkembangan sistem.

Langkah awal dalam melakukan analisis aliran daya adalah mengumpulkan data sistem berupa data beban, data pembangkit, maupun data impedansi saluran. Data beban merupakan data beban daya aktif dan reaktif tiap bus. Data saluran merupakan data nilai impedansi semua saluran yang menghubungkan setiap bus dalam sistem.

Pada Gambar 2.1 menunjukkan terdapat bus dengan beberapa cabang saluran. Besarnya arus bus i tersebut dapat dihitung menggunakan pendekatan hukum Kirchoff untuk arus sebagai berikut:

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}(V_i - V_1) + y_{i2}(V_i - V_2) + y_{i3}(V_i - V_3) + \dots + y_{in}(V_i - V_n) \quad (2.1)$$

$$I_i = y_{i0}V_i + y_{i1}V_i + y_{i2}V_i + y_{i3}V_i + \dots + y_{in}V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - y_{i3}V_3 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.2)$$

$$I_i = (y_{i0} + y_{i1} + y_{i2} + y_{i3} + \dots + y_{in})V_i - y_{i1}V_1 - y_{i2}V_2 - y_{i3}V_3 - \dots - y_{in}V_n \quad (2.3)$$

Untuk nilai daya aktif serta daya reaktif pada bus i didapat dari persamaan berikut

$$P_i + jQ_i = V_i \times I_i^* \quad (2.4)$$

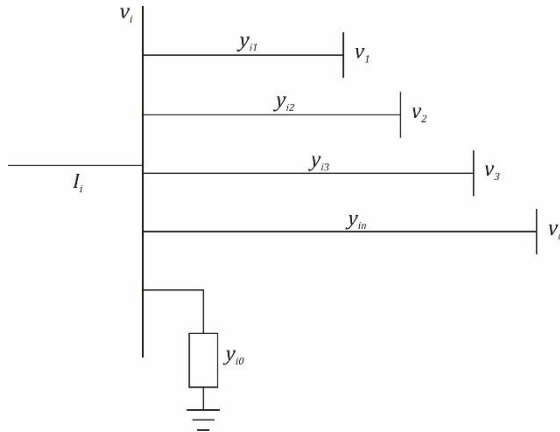
atau

$$I_i = \frac{P_i - jQ_i}{V_i} \quad (2.5)$$

Lalu disubstitusikan antara dua persamaan diatas yakni persamaan (2.4) dan (2.5) didapatkan persamaan dasar untuk aliran daya sebagai berikut:

$$\frac{P_i - jQ_i}{V_i} = V_i \sum_{j=0}^n y_{ij} - \sum_{j=1}^n y_{ij} V_j \quad j \neq i \quad (2.6)$$

dengan n yang merupakan jumlah bus cabang yang terhubung dengan bus i . Dari persamaan (2.6) dapat dilihat bahwa persamaan aliran daya merupakan persamaan yang tidak linear sehingga dibutuhkan proses iterasi untuk mendapatkan solusi persamaan tersebut [3].



Gambar 2.1 Sistem Tenaga Listrik Sederhana

2.3.1 Konsep Daya Listrik

Daya listrik merupakan suatu besar energi yang mengalir pada satu titik jaringan listrik tiap satuan waktu. Satuan dari daya listrik ini adalah Watt atau Joule per detik. Di dalam kelistrikan AC, daya listrik terbagi menjadi tiga jenis yakni daya aktif, daya reaktif, dan daya semu.

Daya aktif atau daya nyata adalah daya yang dibutuhkan oleh beban yang bersifat resistif. Daya aktif mempunyai satuan Watt. Daya aktif ini dapat dirumuskan sebagai perkalian antara tegangan dengan arus listrik serta faktor daya ($\cos \phi$).

$$P = V \times I \times \cos \phi \quad (2.7)$$

Daya reaktif atau daya imajiner merupakan daya yang dibutuhkan untuk membangkitkan medan pada kumparan-kumparan beban induktif. Seperti contohnya pada trafo, daya reaktif digunakan untuk membangkitkan medan magnet pada kumparan di sisi primer, sehingga medan magnet primer tersebut dapat menginduksi kumparan sekunder. Daya reaktif ini diserap oleh beban-beban induktif, namun dapat dihasilkan oleh beban kapasitif. Satuan dari daya reaktif ini adalah VAR. Daya reaktif dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini.

$$Q = V \times I \times \sin \phi \quad (2.8)$$

Daya semu atau biasa disebut daya total ialah hasil perkalian dari tegangan dengan arus yang mengalir. Pada saat kondisi beban resistif murni, maka keseluruhan daya total akan tersalurkan ke beban listrik sebagai daya aktif (P). Namun jika kondisi beban bersifat induktif ataupun kapasitif (beban reaktif), nilai dari daya nyata akan $\cos \phi$ dari daya total. Daya semu dapat dirumuskan dengan persamaan di bawah ini.

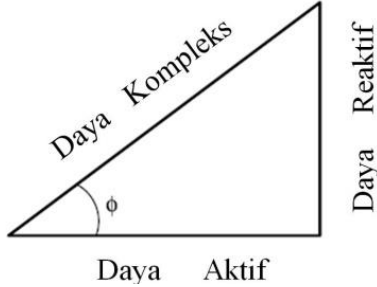
$$S = V \times I \quad (2.9)$$

Hubungan antara daya aktif, reaktif, serta semu dapat dilihat pada Gambar 2.2. Oleh karena itu besar dari daya semu dapat dinyatakan dengan persamaan di bawah ini:

$$S = P + jQ \quad (2.10)$$

dengan nilai magnitudonya sebagai berikut

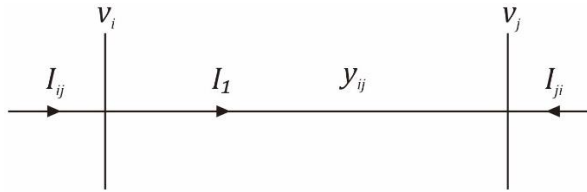
$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.11)$$



Gambar 2.2 Segitiga Daya

2.3.2 Rugi – Rugi Daya

Rugi – rugi daya merupakan rugi yang timbul akibat adanya daya hilang dikarenakan adanya nilai impedansi pada saluran yang saling menghubungkan antar bus. Seperti contohnya pada Gambar 2.3 menunjukkan adanya sebuah saluran yang menghubungkan dua bus. Dari Gambar 2.3 dapat diidentifikasi rugi rugi daya diperoleh dari selisih daya yang dikirim oleh bus i menuju bus j dengan daya yang diterima di bus j . Didefinisikan jika I_{ij} memiliki arah yang positif dari bus i menuju bus j sedangkan I_{ji} memiliki arah yang sebaliknya sehingga didefinisikan negatif [3].



Gambar 2.3 Pemodelan saluran untuk perhitungan rugi-rugi daya

arus I_{ij} yang mengalir dari bus i menuju bus j didefinisikan sebagai

$$I_{ij} = I_1 = y_{ij}(V_i - V_j) \quad (2.12)$$

sedangkan arus I_{ji} yang mengalir dari bus j menuju ke bus i didefinisikan sebagai

$$I_{ji} = -I_1 = y_{ij}(V_j - V_i) \quad (2.13)$$

Untuk daya kompleks S_{ij} dari bus i menuju bus j didefinisikan sebagai

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (2.14)$$

sedangkan daya kompleks S_{ji} dari bus j menuju bus i didefinisikan

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* \quad (2.15)$$

Dari persamaan-persamaan diatas rugi-rugi daya pada saluran antara bus i dan bus j dapat diketahui dari penjumlahan antara persamaan (2.16) dan (2.17) sebagai berikut :

$$S_{Loss\ ij} = S_{ij} + S_{ji} \quad (2.16)$$

$$P_{Loss\ ij} = \text{real}(S_{Loss\ ij}) \quad (2.17)$$

2.4 Drop Tegangan

Nilai drop tegangan / kedip tegangan adalah suatu fenomena penurunan magnitude tegangan efektif terhadap harga nominalnya selama interval waktu t . Perubahan nilai tegangan yang besar serta berlangsung lama akan memiliki dampak yang negatif pada kelangsungan kerja pada sistem. Hal ini dapat menyebabkan ketidakstabilan pada sistem yang akhirnya juga berdampak buruk pada beban, jaringan transmisi, serta peralatan lainnya. Dampak buruk yang dimaksud ialah peralatan peralatan tersebut bekerja tidak sesuai dengan rating atau spesifikasi yang telah ditetapkan oleh pabrik pembuatnya. Sehingga jika berlangsung lama maka akan merusak peralatan tersebut.

Terdapat beberapa standar yang mengatur level tegangan yang ada. Salah satunya yakni berdasarkan standar IEEE 1159 – 1995 seperti yang ditunjukkan pada Tabel 2.1 [4].

Tabel 2.1 Klasifikasi Tegangan berdasarkan Standar IEEE 1159 - 1995

<i>Depth</i>	<i>Duration</i>			
<i>% of Vnominal</i>	0,5 – 30 <i>cycles</i>	30 – 180 <i>cycles</i>	3s – 1min	> 1 min
140 < d <= 180	<i>Instantaneous swells</i>			<i>Over Voltage</i>
120 < d <= 140		<i>Momentary swells</i>		
110 < d <= 120			<i>Temporary</i>	<i>Long duration</i>
90 <= d <= 110	Tegangan normal			
10 <= d <= 90	<i>Instantaneous</i>	<i>Momentary</i>	<i>Temporary</i>	<i>Under Voltage</i>
d < 10	<i>Momentary interruption</i>	<i>Temporary</i>	<i>Sustained</i>	

Dari Tabel 2.1 dapat dilihat jika tegangan memiliki klasifikasi standar masing-masing menurut nilai tegangannya. Tegangan yang dibolehkan dalam hal ini bergantung pada besaran nilai tegangannya serta selang durasi yang diijinkan. Semisal tegangan pada peralatan tidak boleh melebihi nominal 120% – 180% untuk waktu lebih dari 1 menit karena akan menyebabkan peralatan tersebut *over voltage*. Peralatan peralatan yang mengalami *over voltage* atau *under voltage* akan membahayakan peralatan tersebut hingga mengakibatkan pendeknya umur peralatan tersebut.

2.5 Gangguan Pada Sistem Tenaga Listrik

Sebuah pembangkit diharuskan untuk dapat menjaga keandalan serta kontinuitas dalam hal memproduksi listrik secara baik demi untuk melayani kebutuhan masyarakat yang semakin banyak ini. Sehingga sistem tenaga listrik akan terus berjalan dengan baik. Namun pada prakteknya, pembangkit tidak bisa semudah itu dalam menjamin keberlangsungan produksinya. Masih terdapat gangguan-gangguan yang terjadi yang menyebabkan kondisi pada sistem tenaga listrik tidak normal. Gangguan tersebut jika dikategorikan berdasarkan sifatnya dibagi menjadi 2 yakni [5]:

1. Gangguan Sementara

Gangguan sementara atau temporer ini adalah gangguan yang dapat menghilang dengan sendirinya atau akan hilang ketika bagian yang mengalami gangguan diputus secara sesaat dari sistem kelistrikannya. Diputus disini dilakukan oleh cb yang mendapatkan perintah dari rele. Oleh karena itu peralatan-peralatan yang mengalami gangguan seperti ini dapat dioperasikan kembali.

2. Gangguan Permanen

Gangguan permanen ialah gangguan yang terjadi ketika terdapat kerusakan yang sifatnya permanen pada peralatan. Sehingga gangguan ini dapat dihilangkan ketika peralatan yang terkena gangguan dilepas dari sistemnya untuk dapat diperbaiki atau diganti hingga peralatan tersebut dapat dioperasikan kembali seperti semula.

Gangguan arus lebih pada sistem tenaga listrik adalah gangguan yang sering terjadi. Terdapat dua hal penyebab terjadinya gangguan arus lebih yakni beban lebih dan hubung singkat.

2.5.1 Gangguan Beban Lebih

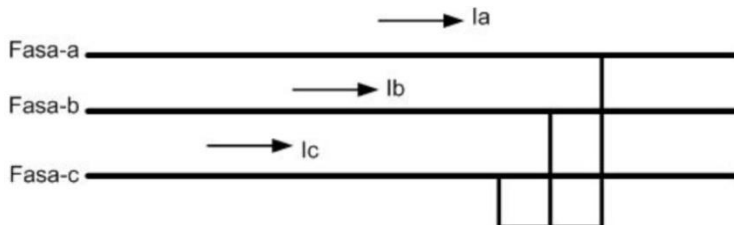
Gangguan beban lebih ialah gangguan yang terjadi ketika arus yang mengalir menuju suatu peralatan melebihi batas arus nominal yang diijinkan ($I > I_n$) [5]. Gangguan ini dapat terjadi saat peralatan mengalami kegagalan isolasi atau saat pengoperasian peralatan yang melebihi rating. Jika terjadi gangguan beban lebih ini harus cepat untuk diatasi atau diamankan agar tidak merusak peralatan akibat arus yang melebihi kapasitas peralatan itu sendiri.

2.5.2 Gangguan Hubung Singkat

Gangguan hubung singkat merupakan gangguan yang terjadi akibat terhubungnya saluran fasa dengan ground atau dengan fasa yang lain. Hubung singkat mengakibatkan timbulnya aliran arus dengan nilai yang besar menuju ke titik gangguan. Aliran arus ini didapat dari arus kontribusi yang berasal dari grid, generator, dan motor listrik AC, sehingga nilai arus gangguan tersebut sangat besar dan membahayakan peralatan listrik di sekitar titik gangguan. Gangguan hubung singkat digolongkan menjadi dua yaitu gangguan hubung singkat simetri dan gangguan hubung singkat asimetri [5].

2.5.2.1 Gangguan Hubung Singkat Simetri

Gangguan hubung singkat simetri atau seimbang adalah gangguan yang terjadi pada ketiga fasanya itu sendiri (L-L-L) atau ketiga fasa tersebut ke tanah (L-L-L-G). Persentase peluang terjadinya gangguan hubung singkat simetri yang terdapat di lapangan sekitar 3% - 5% atau dapat dikatakan jarang terjadi [5]. Pada Gambar 2.4 terlihat saat terjadi gangguan tiga fasa, arus setiap fasanya tetap seimbang karena sama-sama mengalir ke titik gangguan oleh karena itu arus yg berada di titik gangguan sangat besar, sedangkan tegangan pada bus di titik gangguan akan bernilai nol.



Gambar 2. 4 Hubung Singkat Tiga Fasa

Untuk menganalisa gangguan ini dengan menggunakan komponen urutan positif saja [6], seperti perasamaan (2.20) berikut ini :

$$I_{sc3\phi} = \frac{V_{LN}}{Z_1} \quad (2.20)$$

Dengan penjelasan sebagai berikut :

$I_{sc3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa

V_{LN} : tegangan nominal *line to neutral*

Z_1 : impedansi urutan positif yang dilihat dari titik gangguan

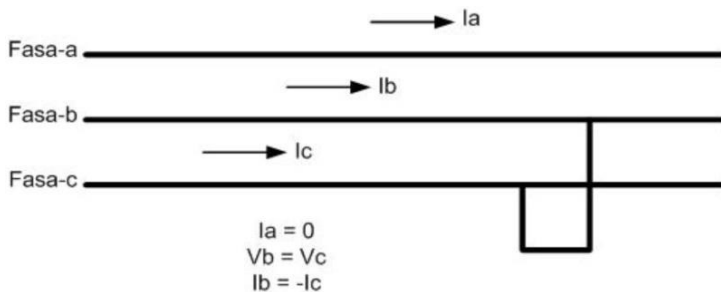
2.5.2.2 Gangguan Hubung Singkat Asimetri

Gangguan hubung singkat asimetri atau tak seimbang adalah gangguan yang terjadi pada dua fasa itu sendiri (L-L), dua ke tanah (L-L-G), dan satu fasa ke tanah (L-G). Persentase peluang terjadinya untuk hubung singkat dua fasa yakni 20% - 25%, untuk hubung singkat dua fasa ke tanah yakni 10% - 15%, sedangkan untuk hubung singkat satu fasa ke tanah sebesar 65% - 70% [5]. Oleh karena itu dapat dilihat bahwa gangguan asimetri adalah gangguan yang paling sering terjadi dengan gangguan satu fasa ke tanah.

Untuk menganalisa gangguan asimetris ini dengan menggunakan komponen urutan positif, komponen urutan negatif, dan komponen urutan nol. Berikut penjelasannya.

1. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa

Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ini terjadi saat antar saluran fasa bersentuhan atau dalam kata lain hubung singkat terjadi diantara kedua fasanya. Gangguan ini merupakan gangguan yang tidak mengandung urutan nol, karena tidak terjadi gangguan yang terhubung ke tanah. Berikut ilustrasi seperti pada Gambar 2.5.



Gambar 2.5 Hubung Singkat Dua Fasa

Untuk menganalisa besarnya arus hubung singkat dua fasa dapat dilihat persamaan (2.21) berikut ini :

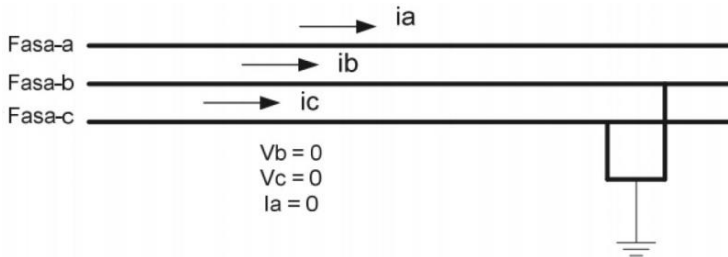
$$I_{sc2\phi} = \frac{V_{LL}}{Z_1 + Z_2} = \frac{\sqrt{3} \times V_{LN}}{2 \cdot Z_1} = \frac{\sqrt{3}}{2} \times I_{sc3\phi} \approx 0.866 \times I_{sc3\phi} \quad (2.21)$$

dimana :

- $I_{sc2\phi}$: arus hubung singkat 2 fasa
- $I_{sc3\phi}$: arus hubung singkat 3 fasa
- V_{LL} : tegangan nominal *line to neutral*
- V_{LN} : tegangan nominal *line to line*
- Z_1 : impedansi urutan positif
- Z_2 : impedansi urutan negatif

2. Gangguan Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Gangguan yang terjadi saat kedua fasanya terhubung ke tanah. Ilustrasi seperti pada Gambar 2.6.



Gambar 2.6 Hubung Singkat Dua Fasa ke Tanah

Untuk menganalisa besarnya arus hubung singkat dua fasa ke tanah dapat dilihat persamaan (2.22) berikut ini :

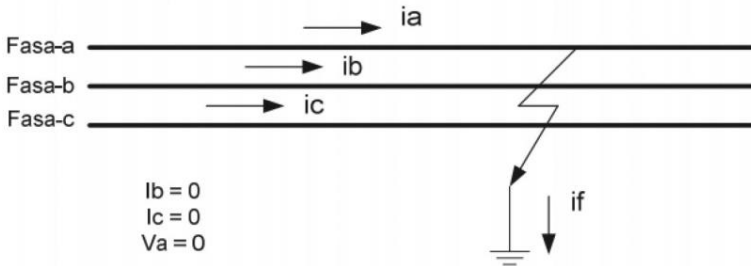
$$I_{A1} = \frac{V_f}{Z_1 + Z_2 Z_0 / (Z_2 + Z_0)} \quad (2.22)$$

dimana :

- I_{A1} : arus hubung singkat 2 fasa ke tanah
- V_f : tegangan bus saat terjadi gangguan
- Z_1 : impedansi urutan positif
- Z_2 : impedansi urutan negatif
- Z_0 : impedansi urutan nol

3. Gangguan Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Gangguan yang terjadi saat salah satu fasanya terhubung ke tanah. Ilustrasi seperti pada Gambar 2.7.



Gambar 2.7 Hubung Singkat Satu Fasa ke Tanah

Untuk menganalisa besarnya arus hubung singkat satu fasa ke tanah dapat dilihat persamaan (2.23) berikut ini :

$$I_{sc1\phi} = \frac{3V_{LN}}{Z_1 + Z_2 + Z_0} \quad (2.23)$$

dimana :

- $I_{sc1\phi}$: arus hubung singkat 1 fasa ke tanah
- V_{LN} : tegangan nominal *line to neutral*
- Z_1 : impedansi urutan positif
- Z_2 : impedansi urutan negatif
- Z_0 : impedansi urutan nol

2.6 Rele Arus Lebih

Rele arus lebih merupakan rele yang digunakan untuk mendeteksi saat terjadi gangguan beban lebih atau terjadi gangguan hubung singkat [5]. Rele arus lebih ini akan beroperasi ketika terdapat arus yang mengalir pada rangkaian melebihi batas *setting* yang telah ditetapkan. Berikut ini keadaan saat rele arus lebih akan bekerja [7] :

$$\begin{aligned} I_f &> I_p && \text{rele bekerja} && (\text{trip}) \\ I_f &< I_p && \text{tidak bekerja} && (\text{blok}) \end{aligned}$$

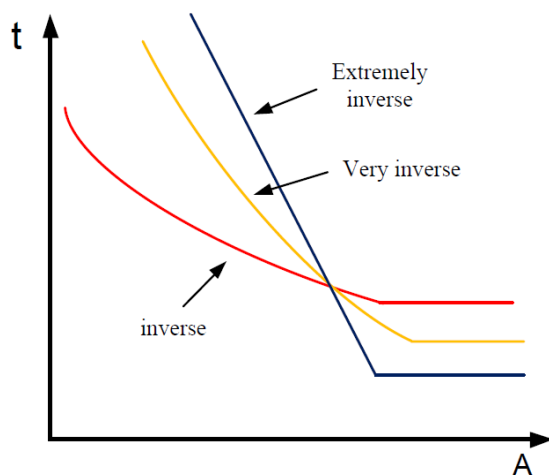
Rele arus lebih akan bekerja atau akan *trip* saat nilai arus I_f melebihi arus I_p yang telah di *setting*. Dimana I_f adalah arus gangguan yang mengalir di sisi primer CT, yang oleh sekunder CT akan dikonversikan dan kemudian dibandingkan dengan I_p . I_p adalah arus *pick*

up yang bisa disetting menurut gulungan sekunder dari trafo arus (CT) yang terhubung ke rele. Menurut karakteristiknya rele arus lebih ini dapat dibedakan dalam 3 jenis yakni rele arus lebih waktu terbalik (*inverse*), rele arus lebih waktu terbatas (*definite*), dan rele arus lebih waktu seketika (*instantaneous*).

2.6.1 Rele Arus Lebih Waktu Terbalik (*Inverse*)

Rele arus lebih waktu terbalik adalah rele yang memiliki karakteristik waktu operasinya berbanding terbalik dengan besarnya arus gangguan [8]. Dapat dikatakan semakin besar arus gangguan yang mengalir, waktu operasi rele akan semakin cepat begitu sebaliknya. Kurva TCC atau *Time Current Characteristic* adalah kurva yang memperlihatkan karakteristik dari waktu-arus dengan skala *time dial*. Nilai dari *time dial* ini akan berpengaruh pada waktu operasi rele serta kemiringan kurvanya.

Menurut standar IEC 60255-3 dan BS-142 kurva invers dibagi menjadi 3 jenis yakni *standard inverse*, *very inverse*, dan *extremely inverse* seperti yang ditunjukkan pada Gambar 2.8. Sedangkan menurut IEEE terdapat karakteristik kurva yang lain seperti *moderately*, *long time*, dan *short time inverse*. Karakteristik tersebut hanya sebagai pelengkap dari standar-standar yang ada sebelumnya.



Gambar 2.8 *Standard Inverse, Very Inverse, dan Extremely Inverse*

Rele arus lebih waktu terbalik diharuskan untuk tidak bekerja pada saat kondisi pembebanan maksimum, namun harus bekerja ketika arus yang mengalir ke peralatan melebihi arus maksimum peralatan. Dengan demikian rele arus lebih waktu terbalik bekerja dengan tujuan untuk melindungi peralatan dan sistem dari gangguan beban lebih (*overload*). Oleh karena itu setting arus rele ini harus lebih besar dari arus beban maksimum (*Full Load Ampere / FLA*).

Ada 2 variabel yang akan diatur dalam mengatur rele arus lebih waktu invers ini yaitu *pick up* dan *time dial*. Pengaturan arus *pick up* pada rele arus lebih ditentukan dengan pemilihan *tap*, seperti ditunjukkan pada persamaan (2.24) berikut ini :

$$Tap = \frac{I_{set}}{CT_{primer}} \quad (2.24)$$

I_{set} merupakan arus *pick up* dengan satuan Ampere. Berdasarkan standar BS 142, batas untuk menentukan I_{set} adalah sebagai berikut :

$$1.05FLA < I_{set} < 1.3FLA \quad (2.25)$$

Pada tugas akhir ini batas yang digunakan untuk menentukan I_{set} adalah sebagai berikut :

$$1.05FLA < I_{set} < 1.4FLA \quad (2.26)$$

Untuk pengaturan *time dial* akan menentukan waktu operasi dari rele waktu invers. Untuk penentuan *time dial* dari masing-masing kurva karakteristik rele arus lebih waktu terbalik, terlebih dahulu menentukan waktu operasi yang dibutuhkan. Berdasarkan standar IEC 60255-3 dan BS-142, nilai *time dial* dapat ditentukan dengan menggunakan persamaan (2.27) berikut :

$$td = \frac{k \times T}{\beta \times \left[\left(\frac{I}{I_{set}} \right)^\alpha - 1 \right]} \quad (2.27)$$

Dengan penjelasan sebagai berikut :

- td : waktu operasi (sekon)
- k : koefisien invers yang ditunjukkan pada Tabel 2.3
- α : koefisien invers yang ditunjukkan pada Tabel 2.3
- β : koefisien invers yang ditunjukkan pada Tabel 2.3
- T : *time dial*
- I : nilai arus (ampere)
- I_{set} : arus *pick up* (ampere)

Tabel 2.2 Koefisien Invers *Time Dial*

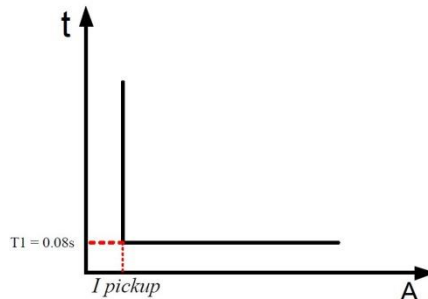
Tipe Kurva	Koefisien		
	k	α	β
<i>Standard Inverse</i>	0,14	0,02	2,970
<i>Very Inverse</i>	13,50	1,00	1,500
<i>Extremely Inverse</i>	80,00	2,00	0,808

2.6.2 Rele Arus Lebih Waktu Seketika (*Instantaneous*)

Rele arus lebih waktu seketika adalah rele yang bekerja tanpa penundaan waktu (*time delay*). Di lapangan, rele arus lebih waktu seketika akan bekerja dengan waktu operasi sebesar 0,08 – 0,1 sekon. Berikut karakteristik rele arus lebih waktu instan seperti pada Gambar 2.9. Ketika arus yang melewati CT melebihi besar arus *pick up*, rele akan memberi sinyal ke CB untuk memutus daya dalam waktu yang singkat (80 ms).

Rele arus lebih waktu seketika biasanya digunakan untuk melindungi peralatan atau sistem dari gangguan arus lebih hubung singkat. Untuk menentukan setelan *pick up*, digunakan arus hubung singkat minimum ($I_{sc\ min}$) yakni arus hubung singkat 2 fasa *line to line* pada pembangkitan minimum. Pengaturan *pick up* pada rele ditetapkan sebagai :

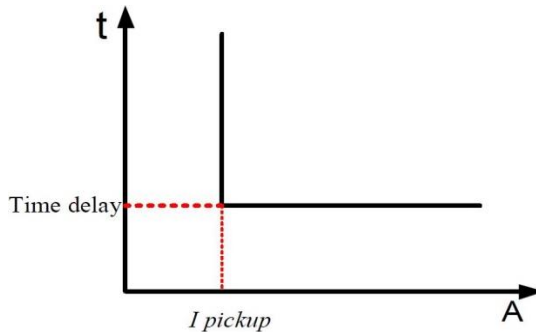
$$I_{set} \leq 0.8 I_{sc\ min} \quad (2.28)$$

**Gambar 2.9** Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Seketika

2.6.3 Rele Arus Lebih Waktu Tertentu (*Definite*)

Rele arus lebih waktu terbatas adalah rele yang bekerja ketika semua nilai arus yang melebihi arus *pick up* yang kemudian memberi

sinyal ke CB untuk memutus daya dengan waktu yang sama (*definite*). Rele arus lebih waktu tertentu ini dalam pengoperasiannya dapat diatur waktu operasi (*time delay*) sesuai dengan kebutuhan koordinasi rele pengaman. Karakteristik rele arus lebih waktu tertentu ditunjukkan pada Gambar 2.10.



Gambar 2.10 Karakteristik Rele Arus Lebih Waktu Tertentu

Oleh karena pada tugas akhir ini akan untuk menentukan I_{set} pada sisi *definite* menggunakan sebagai berikut :

$$1,6 \times I_{FLA} \leq I_{set} \leq 0,8 I_{sc \min} \quad (2.29)$$

2.6.4 Koordinasi Rele

Dalam hal mengamankan sistem serta peralatan peralatan yang ada diharuskan terdapat koordinasi rele yang baik. Yang dimaksud disini ialah rele yang berperan sebagai pengaman utama dengan rele yang berperan sebagai pengaman berlapis / *back up* tidak boleh bekerja secara bersamaan. Oleh karena itu diperlukan adanya pengaturan waktu tunda atau biasa disebut *time delay* antara rele utama dengan rele *back up*. Pengaturan ini biasa disebut dengan kelambatan waktu (Δt) atau *grading time*. Berdasarkan standard time IEEE 242 [9], pengaturan perbedaan *grading time* berkisar antara 0,2 – 0,35 sekon dengan spesifikasi sebagai berikut :

Waktu <i>open CB</i>	: 0,04 – 0,1 sekon (2 – 5 cycle)
<i>Overtravel</i> dari rele	: 0,1 sekon
Faktor keamanan	: 0,12 – 0,22 sekon

Untuk rele static dan rele digital yang berbasis *microprocessor* *overtravel time* dari rele dapat diabaikan, sehingga total waktu yang dibutuhkan 0,2 – 0,4 sekon.

BAB 3

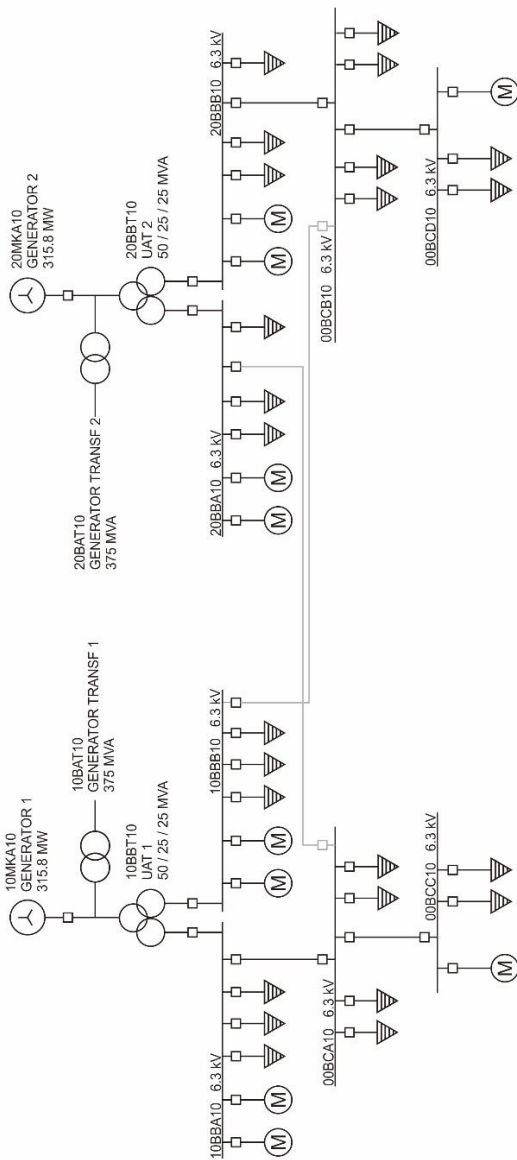
SISTEM KELISTRIKAN PLTU REMBANG

3.1 Seputar Tentang PLTU Rembang

PLTU Rembang merupakan pembangkit listrik tenaga uap yang berlokasi di Desa Leran dan Trahan, Kecamatan Sluke, Kabupaten Rembang, Jawa Tengah dan hak pengelola ditanggung oleh PT. PJB UBJOM yang merupakan anak perusahaan dari PT. PLN. PLTU ini menggunakan batu bara sebagai bahan bakar utama dalam memproduksi listrik. Kapasitas dari PLTU Rembang ini yakni 2 x 315 MW yang artinya memiliki 2 unit pembangkitan dengan masing-masing kapasitasnya yakni 315 MW. Hasil produksi listrik dari PLTU Rembang ini akan disalurkan melalui SUTT (Saluran Udara Tegangan Tinggi) 150 kV ke gardu induk Rembang yang berjarak 22 km dan gardu induk Pati yang berjarak 60 km. PLTU Rembang ini dibangun guna untuk mengatasi krisis listrik Jawa – Bali khususnya di daerah sekitar Rembang.

3.2 Sistem Kelistrikan PLTU Rembang

Sistem kelistrikan PLTU Rembang merupakan sistem kelistrikan radial yang memiliki dua unit generator utama dengan masing-masing kapasitas 315 MW dan dengan level tegangan bus 20 kV dan 6,3 kV. Pada rating tegangan menengah 20 kV digunakan untuk menyalurkan daya listrik dari generator utama ke transformator UAT. Sedangkan rating tegangan menengah 6,3 kV digunakan untuk menyalurkan daya dari transformator UAT ke semua beban. Untuk lebih jelas dapat dilihat di Gambar 3.1.



Gambar 3.1 Sistem Kelistrikan *Existing* PLTU Rembang

3.3 Kapasitas Pembangkitan

PLTU Rembang memiliki 2 unit generator yang semuanya merupakan generator utama. Pada Tabel 3.1 merupakan data kapasitas pembangkitan.

Tabel 3.1 Data Kapasitas Pembangkitan di PLTU Rembang

No	ID Generator	Rating		PF	Frekuensi
		kV	MW		
1	10MKA10	20	315.8	0.85	50 Hz
2	20MKA10	20	315.8	0.85	50 Hz

3.4 Sistem Distribusi PLTU Rembang

Sistem distribusi yang digunakan untuk memenuhi semua beban pemakaian sendiri di PLTU Rembang ini adalah sistem distribusi radial. Daya yang keluar dari generator 10MKA10 selain disalurkan ke generator transformer 10BAT10 melalui bus 10BAA11 yang kemudian ditransmisikan ke beban, disalurkan ke transformator UAT 10BBT10 melalui bus 10BBA12 dengan level tegangan 20 kV. Selanjutnya setelah dari transformator UAT 10BBT10 daya menuju ke bus 10BBA10 dan bus 10BBB10 dengan level tegangan 6.3 kV. Daya dari bus 10BBA10 disalurkan kembali ke bus 00BCA10 dan kemudian dari bus 00BCA10 disalurkan ke bus 00BCC10.

Untuk daya yang keluar dari generator 20MKA10 selain disalurkan ke generator transformer 20BAT10 melalui bus 20BAA11 yang kemudian ditransmisikan ke beban, disalurkan ke transformator UAT 20BBT10 melalui bus 20BBA12 dengan level tegangan 20 kV. Selanjutnya setelah dari transformator UAT 20BBT10 daya menuju ke bus 20BBA10 dan bus 20BBB10 dengan level tegangan 6.3 kV. Daya dari bus 20BBB10 disalurkan kembali ke bus 00BCB10 dan kemudian dari bus 00BCB10 disalurkan ke bus 00BCD10. Pada Tabel 3.2 merupakan data bus di PLTU Rembang.

Tabel 3.2 Data Bus di PLTU Rembang

No	ID Bus	Level Tegangan Nominal Bus
1	10BAA11	20 kV
2	10BBA12	20 kV
3	20BAA11	20 kV
4	20BBA12	20 kV
5	10BBA10	6.3 kV

Tabel 3.2 (Lanjutan) Data Bus di PLTU Rembang

No	ID Bus	Level Tegangan Nominal Bus
6	10BBB10	6.3 kV
7	20BBA10	6.3 kV
8	20BBB10	6.3 kV
9	00BCA10	6.3 kV
10	00BCC10	6.3 kV
11	00BCB10	6.3 kV
12	00BCD10	6.3 kV

Untuk mengubah level tegangan dari 20 kV ke tegangan yang lebih rendah yakni 6.3 kV maka digunakan transformator daya sebagai peralatan pengubah level tegangan. Transformator daya yang digunakan di PLTU Rembang yakni transformator UAT. Disebut transformator UAT karena kegunaannya yakni untuk memenuhi kebutuhan pemakaian sendiri. Transformator UAT yang digunakan ada 2 yakni transformator UAT unit 1 dan transformator UAT unit 2. Pada Tabel 3.3 merupakan data transformator UAT yang digunakan di PLTU Rembang.

Tabel 3.3 Data Transformator UAT PLTU Rembang

No	ID Transformator	Daya (MVA)	Tegangan (kV)	Hubungan
1	10BBT10	50/25/25	20/6.6/6.6	<i>Delta/Wye/Wye</i>
2	20BBT10	50/25/25	20/6.6/6.6	<i>Delta/Wye/Wye</i>

3.5 Data Beban pada PLTU Rembang

Untuk menunjang proses produksi listrik, PLTU Rembang memiliki berbagai macam peralatan yang bekerja terus menerus serta beberapa diantaranya dalam posisi stand by. Peralatan beban pemakaian sendiri tersebut sebagian besar berupa motor induksi. Selain motor induksi, beban pemakaian sendiri pada PLTU Rembang juga berupa beban statis. Semua beban-beban tersebut terdapat dalam bus dengan level tegangan 6,3 kV. Pada Tabel 3.4 merupakan data beban di PLTU Rembang.

Tabel 3.4 Data Beban PLTU Rembang

No	ID Beban	Jenis Peralatan	Kapasitas	Kondisi
Bus 10BBA10 (6,3 kV)				
1	MILL A1	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 (Lanjutan) Data Beban PLTU Rembang

No	ID Beban	Jenis Peralatan	Kapasitas	Kondisi
2	MILL B1	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
3	MILL C1	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Spare</i>
4	CCWP 1A	<i>Motor</i>	280 kW	<i>Continuous</i>
5	CEP 1A	<i>Motor</i>	1000 kW	<i>Spare</i>
6	PAF 1A	<i>Motor</i>	1700 kW	<i>Continuous</i>
7	FDF 1A	<i>Motor</i>	450 kW	<i>Continuous</i>
8	IDF 1A	<i>Motor</i>	2150 kW	<i>Continuous</i>
9	IAC-1	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
10	SAC-1	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
11	UST-1A1	<i>Static</i>	1600 kVA	<i>Continuous</i>
12	UST-1A2	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
13	ESP-1A	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
Bus 00BCA10 (6,3 kV)				
1	SST-1A	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
2	SST-A2	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
3	ADM-1A	<i>Static</i>	630 kVA	<i>Continuous</i>
4	CHP-1	<i>Static</i>	3750 kVA	<i>Continuous</i>
Bus 00BCC10 (6,3 kV)				
1	DESAL-1A	<i>Motor</i>	200 kW	<i>Continuous</i>
2	DESAL-1B	<i>Motor</i>	200 kW	<i>Continuous</i>
3	CWP-1A	<i>Motor</i>	2100 kW	<i>Continuous</i>
4	CWP-1B	<i>Motor</i>	2100 kW	<i>Continuous</i>
5	CHLOR ISLD-1A	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
6	CHLOR-1	<i>Static</i>	550 kVA	<i>Spare</i>
Bus 10BBB10 (6,3 kV)				
1	MILL-D1	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
2	MILL-E1	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
3	CCWP-1B	<i>Motor</i>	280 kW	<i>Spare</i>
4	CEP-1B	<i>Motor</i>	1000 kW	<i>Continuous</i>
5	PAF-1B	<i>Motor</i>	1700 kW	<i>Continuous</i>
6	FDF-1B	<i>Motor</i>	450 kW	<i>Continuous</i>
7	IDF-1B	<i>Motor</i>	2150 kW	<i>Continuous</i>
8	IAC-3	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
9	BFP-1B	<i>Motor</i>	3300 kW	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 (Lanjutan) Data Beban PLTU Rembang

No	ID Beban	Jenis Peralatan	Kapasitas	Kondisi
10	ESP-1B	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
11	UST-1B1	<i>Static</i>	1600 kVA	<i>Continuous</i>
12	UST-1B2	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
Bus 20BBA10 (6,3 kV)				
1	MILL-D2	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
2	MILL-E2	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Spare</i>
3	CCWP-2A	<i>Motor</i>	280 kW	<i>Continuous</i>
4	CEP-2A	<i>Motor</i>	1000 kW	<i>Continuous</i>
5	PAF-2A	<i>Motor</i>	1700 kW	<i>Continuous</i>
6	FDF-2A	<i>Motor</i>	450 kW	<i>Continuous</i>
7	IDF-2A	<i>Motor</i>	2150 kW	<i>Continuous</i>
8	BFP-2A	<i>Motor</i>	3300 kW	<i>Continuous</i>
9	IAC-2	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
10	SAC-2	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
11	UST-2A1	<i>Static</i>	1600 kVA	<i>Continuous</i>
12	ESP-2A	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
13	UST-2A2	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
Bus 20BBB10 (6,3 kV)				
1	MILL-A2	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
2	MILL-B2	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
3	MILL-C2	<i>Motor</i>	520 kW	<i>Continuous</i>
4	CCWP-2B	<i>Motor</i>	280 kW	<i>Spare</i>
5	CEP-2B	<i>Motor</i>	1000 kW	<i>Spare</i>
6	PAF-2B	<i>Motor</i>	1700 kW	<i>Continuous</i>
7	FDF-2B	<i>Motor</i>	450 kW	<i>Continuous</i>
8	IDF-2B	<i>Motor</i>	2150 kW	<i>Continuous</i>
9	SAC-3	<i>Motor</i>	250 kW	<i>Continuous</i>
10	UST-2B1	<i>Static</i>	1600 kVA	<i>Continuous</i>
11	UST-2B2	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
12	ESP-2B	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
Bus 00BCB10 (6,3 kV)				
1	CHP-2	<i>Static</i>	3750 kVA	<i>Continuous</i>
2	ADM-1B	<i>Static</i>	630 kVA	<i>Continuous</i>
3	SST-1B	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>
4	SST-B2	<i>Static</i>	2500 kVA	<i>Continuous</i>

Tabel 3.4 (Lanjutan) Data Beban PLTU Rembang

No	ID Beban	Jenis Peralatan	Kapasitas	Kondisi
Bus 00BCD10 (6,3 kV)				
1	CHLOR-2	<i>Static</i>	550 kVA	<i>Continuous</i>
2	CHLOR ISLD-1B	<i>Static</i>	2000 kVA	<i>Continuous</i>
3	CWP-2A	<i>Motor</i>	2100 kW	<i>Continuous</i>
4	CWP-2B	<i>Motor</i>	2100 kW	<i>Continuous</i>
5	DESAL-2A	<i>Motor</i>	200 kW	<i>Continuous</i>
6	DESAL-2B	<i>Motor</i>	200 kW	<i>Continuous</i>

3.6 Sistem Pengaman Arus Lebih

Sistem pengaman arus lebih sangat diperlukan agar sistem terlindung dari gangguan arus lebih yang terdapat pada fasa. Hal ini dilakukan demi menghindari hal-hal yang dapat mengganggu kinerja dari sistem agar tidak terhenti. Oleh karena itu pengaman peralatan harus sepatutnya terkoordinasi dengan baik.

Peralatan yang dibutuhkan dalam hal mengamankan arus lebih ini adalah rele arus lebih. Dalam pengaturan rele arus lebih diperlukan nilai-nilai konstanta setiap produk. Berikut adalah rele arus lebih yang digunakan pada tugas akhir ini :

Tabel 3. 5 Spesifikasi Rele Arus Lebih

Merlin Gerin Sepam 40 [10]			
<i>Overcurrent</i>		<i>Instantaneous</i>	
Pick up Range	Curve Type	Pick up Range	Delay Range
0,1 – 2,4 x Sek CT	IEC, IAC, IEEE	0,1 – 24 x Sek CT	0,05 – 300 detik

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BAB 4

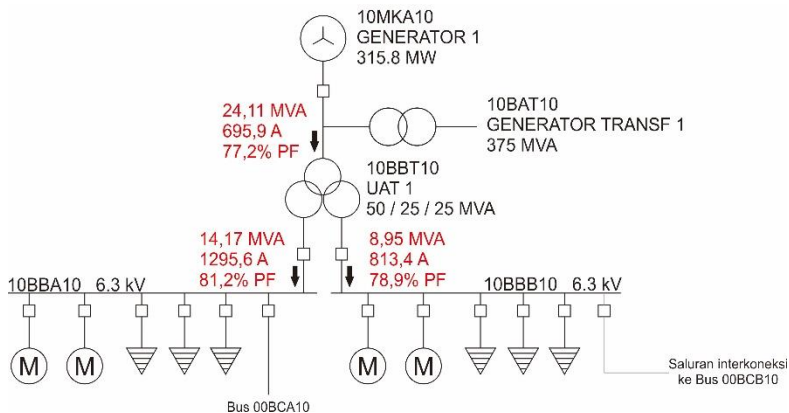
HASIL SIMULASI DAN ANALISIS STUDI PADA PLTU REMBANG

4.1 Analisa Aliran Daya Pada Eksisting PLTU Rembang

Hasil analisa aliran daya pada sistem kelistrikan eksisting ini dibagi menjadi tiga bagian. Yang pertama yaitu dalam kondisi operasi normal sehingga tidak ada transformator yang *off* atau mati. Yang kedua adalah dalam kondisi saat transformator UAT 2 *off* sehingga beban yang awalnya ditanggung oleh transformator UAT 2 di *back up* oleh transformator UAT 1. Yang ketiga yakni kebalikan dari yang kedua dimana transformator UAT 1 *off* sehingga beban yang awalnya ditanggung oleh transformator UAT 1 di *back up* oleh transformator UAT 2.

4.1.1 Analisa Aliran Daya saat Kondisi Normal

Berdasarkan simulasi yang telah dilakukan pada sistem eksisting PLTU Rembang saat kondisi normal didapatkan hasil seperti ilustrasi pada Gambar 4.1 unit 1 generator 1 10MKA10 menyuplai daya sebesar 24,11 MVA, dengan arus 695,9 A dan faktor daya 0,78. Lalu oleh transformator UAT 1 di *step down* dan keluaran hasil transformator UAT 1A besar daya 14,17 MVA dengan arus 1295,6 A dan faktor daya 0,82 serta UAT 1B dengan daya 8,95 MVA arus 813,4 A dan faktor daya 0,79. Berikut untuk data lengkap pada Tabel 4.1.



Gambar 4.1 Hasil Analisis Aliran Daya Unit 1 saat Operasi Normal

Tabel 4.1 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 1 PLTU Rembang pada kondisi Normal

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Generator 1	20	695,9	18,63	15,4	24,11	77,2
UAT 1A	6,313	1295,6	11,5	8,3	14,17	81,2
UAT 1B	6,35	813,4	7,1	5,5	8,95	78,9

Dari hasil yang telah didapatkan diatas bisa digunakan untuk menghitung *loading factor* pada masing-masing bagian. Untuk *loading factor* pada bagian 1A dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

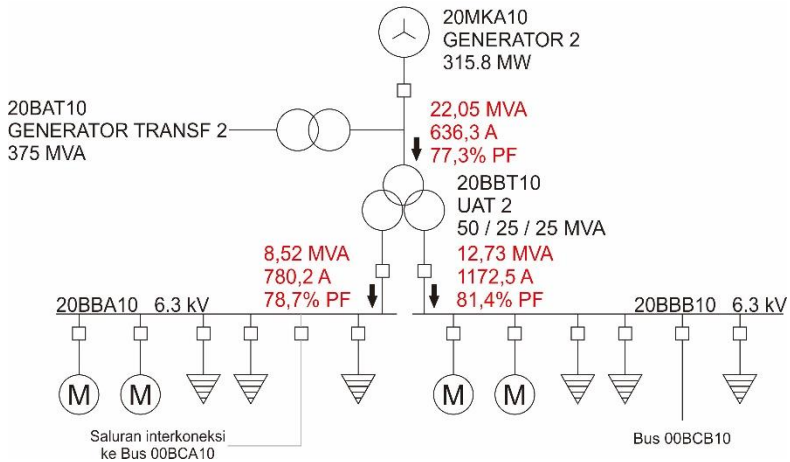
$$f_{Load} = \frac{\text{Total Load}}{\text{Maximum Load}} \times 100\% = \frac{14,17}{25} \times 100\% = 56,58\%$$

Sedangkan untuk *loading factor* pada bagian 1B dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{\text{Total Load}}{\text{Maximum Load}} \times 100\% = \frac{8,95}{25} \times 100\% = 35,8\%$$

Kemudian untuk unit 2 hasil seperti pada ilustrasi Gambar 4.2 generator 2 menyuplai daya sebesar 22,05% dengan arus 636,3 A serta faktor daya 0,78. Lalu oleh transformator UAT 2 di *step down* dan keluaran hasil transformator UAT 2A besar daya 8,6 MVA dengan arus 780,2 A dan faktor daya 0,79 serta UAT 2B dengan daya 12,73 MVA

arus 1172,5 A dan faktor daya 0,82. Berikut untuk data lengkap pada Tabel 4.2.



Gambar 4.2 Hasil Analisis Aliran Daya Unit 2 saat Operasi Normal

Tabel 4.2 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 2 PLTU Rembang pada kondisi Normal

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Generator 2	20	636,3	17,1	13,98	22,05	77,3
UAT 2A	6,302	780,2	6,71	5,26	8,52	78,7
UAT 2B	6,267	1172,5	12,36	7,4	12,73	81,4

Sama seperti sebelumnya dari hasil yang telah didapatkan diatas bisa digunakan untuk menghitung *loading factor* pada masing-masing bagian. Untuk *loading factor* pada bagian 2A dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{8,52}{25} \times 100\% = 34,1\%$$

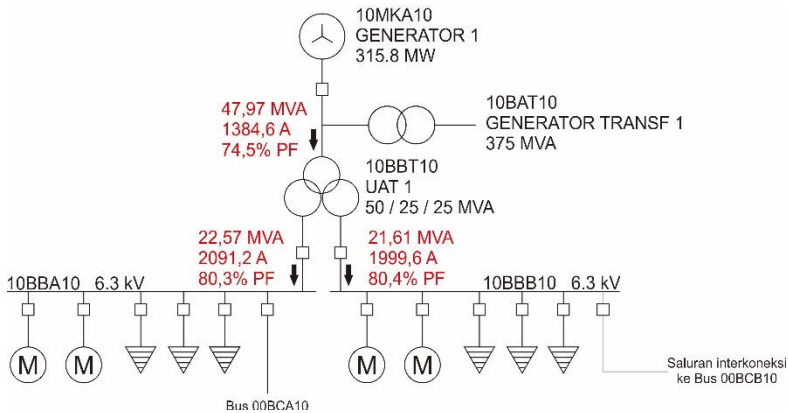
Sedangkan untuk *loading factor* pada bagian 2B dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{12,73}{25} \times 100\% = 50,92\%$$

Setelah didapat nilai *loading factor* pada masing masing bagian dapat dinyatakan bahwa transformator UAT 1 maupun UAT 2 tidak terbebani melebihi 50% dari kapasitas masing-masing transformator.

4.1.2 Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 2 off

Dari simulasi yang telah dilakukan didapatkan hasil seperti ilustrasi pada Gambar 4.3 bahwa generator menyuplai daya sebesar 47,97 MVA dengan arus 1384,6 A serta faktor daya 0,75. Hasil data lengkap pada Tabel 4.3.



Gambar 4.3 Hasil Analisa Aliran Daya saat Transformer UAT 2 off

Tabel 4.3 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 1 PLTU Rembang pada saat Transformator UAT 2 off

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Generator 1	20	1384,6	37,72	32,02	47,97	74,5
UAT 1A	6,231	2091,2	18,12	13,46	22,57	80,3
UAT 1B	6,239	1999,6	17,37	12,86	21,61	80,4

Dari hasil yang telah didapatkan diatas bisa digunakan untuk menghitung *loading factor* pada masing-masing bagian. Untuk *loading factor* pada bagian 1A dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{22,57}{25} \times 100\% = 90,28\%$$

Sedangkan untuk *loading factor* pada bagian 1B dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{21,61}{25} \times 100\% = 86,44\%$$

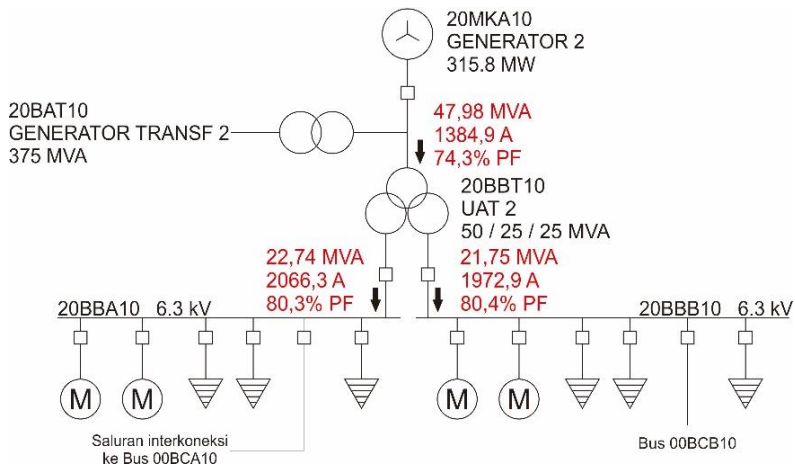
Dan untuk *loading factor* transformator dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{47,97}{50} \times 100\% = 95,54\%$$

Berdasarkan SPLN no 50 Tahun 1997 standar optimal pembebanan untuk transformator sebesar 60% - 80%, sehingga jika dilihat dari *loading factor* untuk bagian 1A maupun 1B termasuk dalam kategori diatas standar optimal pembebanan trafo atau bisa dikatakan pembebanan berat. Hal ini sangat tidak direkomendasikan untuk dipakai secara terus menerus karena akan berdampak pada semakin singkatnya umur transformator. Apalagi *loading factor* transformator sebesar 95,54% yang bisa dikategorikan sebagai fase kritis pembebanan sebuah transformator dengan pembebanan diatas 95%.

4.1.3 Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 1 off

Hasil yang didapat dari simulasi saat Transformator UAT 1 off seperti ilustrasi Gambar 4.4 adalah generator 2 menyuplai daya sebesar 47,98 MVA dengan arus 1384,9 A serta faktor daya 0,75. Hasil data lengkap pada Tabel 4.4.



Gambar 4.4 Hasil Analisa Aliran Daya saat Transformator UAT 1 *off*

Tabel 4.4 Data Hasil Aliran Daya Pada Unit 2 PLTU Rembang pada saat Transformator UAT 1 *off*

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Generator 2	20	1384,9	35,66	32,1	47,98	74,3
UAT 2A	6,353	2066,3	18,25	13,46	22,74	80,3
UAT 2B	6,363	1972,9	17,5	12,86	21,75	80,4

Sama seperti sebelumnya dari hasil yang telah didapatkan diatas bisa digunakan untuk menghitung *loading factor* pada masing-masing bagian. Untuk *loading factor* pada bagian 2A dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{22,74}{25} \times 100\% = 90,96\%$$

Sedangkan untuk *loading factor* pada bagian 2B dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{21,75}{25} \times 100\% = 87\%$$

Dan untuk *loading factor* transformator dapat dihitung dengan cara sebagai berikut :

$$f_{Load} = \frac{Total\ Load}{Maximum\ Load} \times 100\% = \frac{47,98}{50} \times 100\% = 96\%$$

Sama seperti sebelumnya, hasil yang didapat di sub bab ini tidak jauh beda dengan yang sebelumnya. Oleh karena itu hasil analisa yang didapatkan juga sama dengan hasil analisa sebelumnya dimana pembebanan sebuah transformator berada di fase kritis yakni diatas 95%.

4.2 Pemodelan Sistem Kelistrikan PLTU Rembang

Pemodelan sistem kelistrikan PLTU Rembang dilakukan dengan memperhatikan data-data peralatan seperti data generator, transformator, bus, serta berbagai macam beban sehingga hasil yang didapat mendekati *plant* yang sebenarnya. Selain itu tujuan dari pemodelan ini adalah agar dapat diketahui kondisi sistem kelistrikan *existing* dan kondisi sistem kelistrikan baru dengan adanya penambahan transformator SST. Setelah dilakukan pemodelan sistem kelistrikan PLTU Rembang, kemudian akan dilakukan berbagai macam studi analisis yang akan dibahas pada sub bab berikutnya. Semua pemodelan ini dilakukan dengan membuat *Single Line Diagram* pada *software* ETAP 12.6.0.

4.2.1 Pemilihan Transformator SST

Pendasaran utama dalam memilih transformator SST yakni dari jumlah keperluan beban di masing-masing unit. Pada unit 1 PLTU Rembang, jumlah keperluan beban yang ditanggung jika dilihat dari hasil analisis daya saat unit 1 dalam kondisi normal generator 10MKA10 menyuplai sebesar daya 24,11 MVA. Pada unit 2 PLTU Rembang, jumlah keperluan beban yang ditanggung jika dilihat dari hasil analisis daya saat unit 2 dalam kondisi normal generator 20MKA10 menyuplai daya sebesar 22,05 MVA. Oleh karena fungsi transformator SST ini diperlukan saat transformator salah satu unit mati, maka dipilih salah satu daya yang terbesar yang berarti adalah 24,11 MVA. Menurut SPLN, dalam memilih rating transformator dapat dihitung dengan persamaan berikut ini.

$$S_{kapasitas} = \frac{kVA\ Beban}{0,8} = \frac{24,11}{0,8} \approx 30MVA$$

Secara garis besar transformator SST memiliki spesifikasi berdasarkan simulasi seperti Tabel 4.5.

Tabel 4.5 Spesifikasi Transformator SST

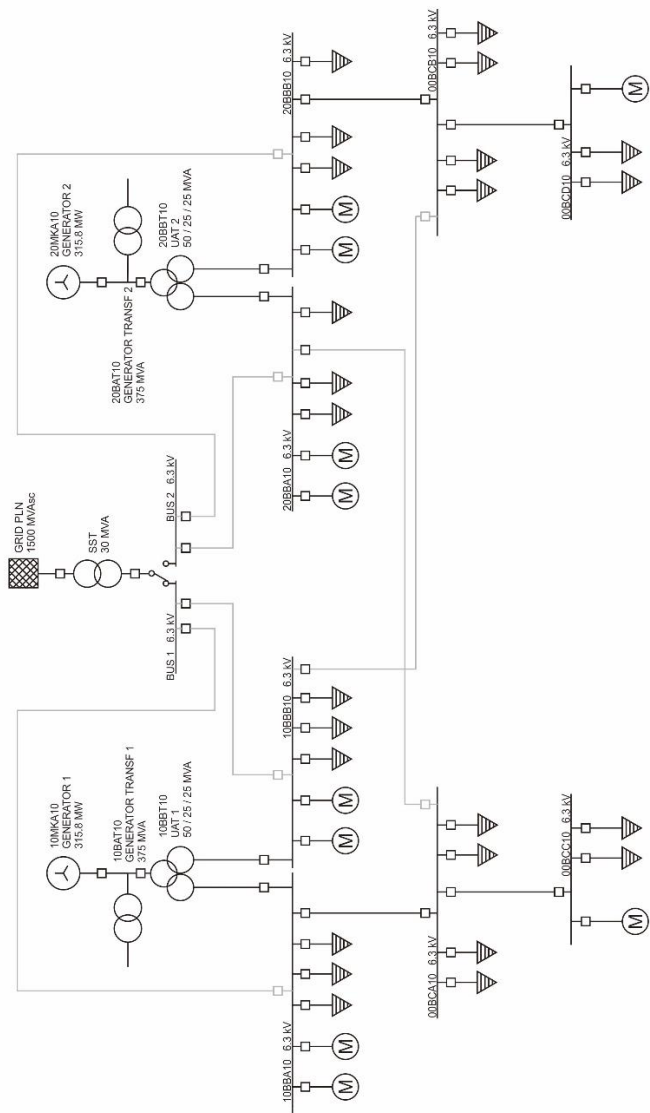
Nameplate	Transformator SST
Kapasitas	30 MVA
Tegangan Primer	20 kV
Tegangan Sekunder	6,6 kV
FLA Primer	866 A
FLA Sekunder	2624 A
Impedansi	12,5%
Frekuensi	50 Hz
Sistem Pendinginan	ONAN

Untuk menyalurkan suplai daya dari transformator SST melalui bus 1 dan 2 ke bus 10BBA10, 10BBB10, 20BBA10, dan 20BBB10 digunakan kabel dengan panjang 200 m dengan spesifikasi sebagai berikut :

Tabel 4. 6 Spesifikasi Kabel

Nameplate	Kabel
Standar kabel	Caled BS6622
Frekuensi	50 Hz
Tipe Konduktor	Tembaga
Tegangan	6,3 kV
Jumlah Inti	3 inti
Jenis Isolasi	XLPE
Luas Penampang	400 mm ²
Resistansi di 20°C	0,064 ohm/km

Berikut adalah sistem kelistrikan terbaru setelah dipasang transformator SST yang ditunjukkan pada Gambar 4.5.



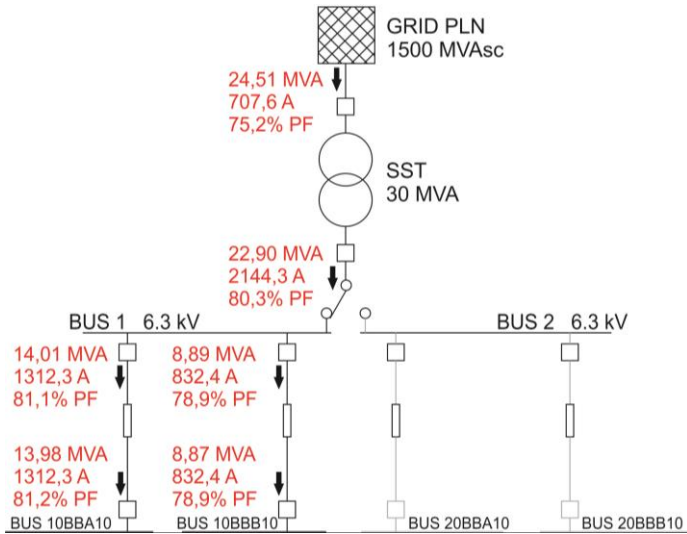
Gambar 4. 5 Sistem Kelistrikan Terbaru PLTU Rembang

4.3 Analisis Aliran Daya

Setelah dilakukan simulasi menggunakan perangkat lunak ETAP 12.6.0 maka dilakukan analisis aliran daya. Analisis aliran daya ini digunakan untuk mengetahui nilai daya aktif maupun reaktif yang telah disuplai oleh sumber lalu dikirim hingga ke beban. Tak hanya daya saja yang dapat diketahui, namun juga tegangan, arus, dan faktor daya. Dari data data tersebut yang diketahui kita bisa menghitung *losses* yang timbul saat adanya aliran daya menuju ke beban. Pada analisis aliran daya ini dibagi menjadi dua bagian. Yang pertama adalah kondisi dimana transformator UAT 1 *off* sehingga suplai untuk beban dibawah transformator UAT 1 disuplai dari transformator SST. Bagian yang kedua adalah kondisi dimana transformator UAT 2 *off* sehingga suplai untuk beban dibawah transformator UAT 2 disuplai dari transformator SST.

4.3.1 Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 *off*

Hasil data yang didapatkan dari simulasi aliran daya pada saat transformator UAT 1 *off* dan kemudian di *back up* oleh transformator SST ialah grid menyuplai daya sebesar 24,51 MVA dengan arus 707,6 A dan faktor daya 0,75. Berikut ilustrasi pada Gambar 4.6 dan hasil data lengkap ada pada Tabel 4.7.



Gambar 4.6 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 *off*

Tabel 4.7 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 1 *off*

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Grid PLN	20	707,6	18,44	16,16	24,51	75,2
Bus 1	6,165	2144,3	18,38	13,65	22,90	80,3
UAT 1A sebelum kabel	6,165	1312,3	11,37	8,19	14,01	81,1
UAT 1B sebelum kabel	6,165	832,4	7,011	5,46	8,89	78,9
Bus 10BBA10	6,15	1312,3	11,35	8,16	13,98	81,2
Bus 10BBB10	6,155	832,4	7,00	5,45	8,87	78,9

Berdasarkan hasil data yang telah didapat, dapat dilihat bahwa tidak ada peralatan yang bekerja di luar nilai ratingnya. Semua peralatan bekerja sesuai dengan nilai rating atau spek yang sudah ditentukan sebelumnya. Oleh karena itu menandakan juga bahwa suplai aliran daya

berjalan dengan baik. Namun saja terdapat beberapa daya yang *losses* saat terjadinya suplai aliran daya ini. Seperti halnya daya yang keluar dari Bus 1 yakni UAT 1A sebelum kabel sebesar 14,01 MVA dengan daya yang mengalir ke Bus 10BBA10 sebesar 13,98 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 14,01 - 13,98 = 0,03 \text{ MVA}$$

Bagitu pula untuk daya yang keluar Bus 1 yakni UAT 1B sebelum kabel sebesar 8,89 MVA dengan daya yang mengalir ke Bus 10BBB10 sebesar 8,87 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 8,89 - 8,87 = 0,02 \text{ MVA}$$

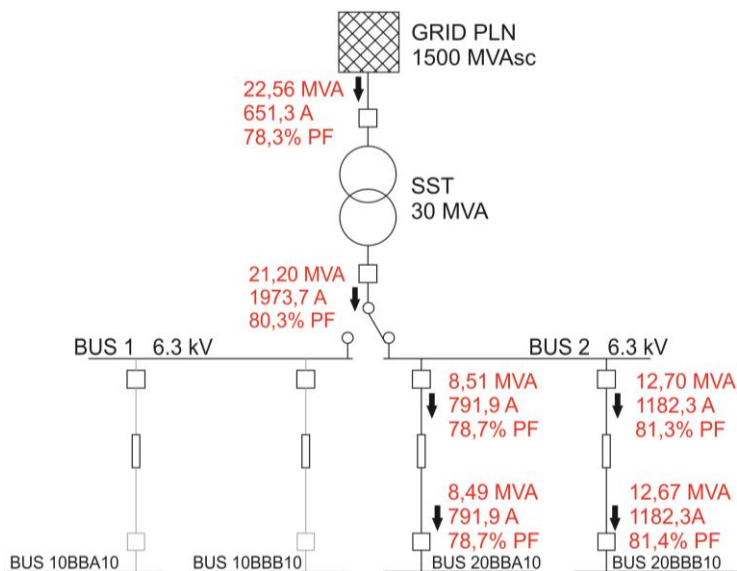
Hal ini diakibatkan karena adanya impedansi pada saluran yang menyebabkan adanya *losses* daya yang dikirim oleh transformator SST. Selain diakibatkan oleh kabel, daya pada transformator juga mengalami penurunan. Daya yang masuk pada transformator SST adalah sebesar 24,51 MVA, namun daya yang keluar pada transformator SST sebesar 22,90 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 24,51 - 22,90 = 1,61 \text{ MVA}$$

Losses ini diakibatkan karena adanya rugi-rugi yang ada pada transformator seperti rugi tembaga dan rugi inti. Namun semua rugi-rugi tersebut tidak sampai mengganggu aliran suplai daya ke beban.

4.3.2 Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 off

Pada saat transformator UAT 2 *off*, suplai daya ke beban di bawah UAT 2 langsung di *back up* oleh transformator SST. Hasil data yang didapat ialah grid menyuplai daya sebesar 22,56 MVA dengan arus sebesar 651,3 A dan faktor daya 0,78. Berikut ilustrasi pada Gambar 4.7 dan hasil data lengkap ada pada Tabel 4.8.



Gambar 4.7 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 off

Tabel 4.8 Hasil Analisis Aliran Daya saat Transformator UAT 2 off

Peralatan	kV	A	MW	MVAR	MVA	PF (%)
Grid PLN	20	651,3	17,07	14,76	22,56	75,6
Bus 2	6,201	1973,7	17,02	12,64	21,20	80,3
UAT 2A sebelum kabel	6,201	791,9	6,69	5,25	8,51	78,7
UAT 2B sebelum kabel	6,201	1182,3	10,33	7,39	12,70	81,3
Bus 20BBA10	6,192	791,9	6,68	5,24	8,49	78,7
Bus 20BBB10	6,188	1182,3	10,31	7,36	12,67	81,4

Berdasarkan hasil data yang telah didapat, dapat dilihat bahwa tidak ada peralatan yang bekerja di luar nilai ratingnya. Semua peralatan bekerja sesuai dengan nilai rating atau spek yang sudah ditentukan

sebelumnya. Oleh karena itu menandakan juga bahwa suplai aliran daya berjalan dengan baik. Namun saja terdapat beberapa daya yang *losses* saat terjadinya suplai aliran daya ini. Seperti halnya daya yang keluar dari Bus 2 yakni UAT 2A sebelum kabel sebesar 8,51 MVA dengan daya yang mengalir ke Bus 20BBA10 sebesar 8,49 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 8,51 - 8,49 = 0,02 \text{ MVA}$$

Bagitu pula untuk daya yang keluar Bus 2 yakni UAT 2B sebelum kabel sebesar 12,7 MVA dengan daya yang mengalir ke Bus 20BBB10 sebesar 12,67 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 12,7 - 12,67 = 0,03 \text{ MVA}$$

Hal ini diakibatkan karena adanya impedansi pada saluran yang menyebabkan adanya *losses* daya yang dikirim oleh transformator SST. Selain diakibatkan oleh kabel, daya pada transformator juga mengalami penurunan. Daya yang masuk pada transformator SST adalah sebesar 22,56 MVA, namun daya yang keluar pada transformator SST sebesar 21,2 MVA. Jika dihitung besar *losses* yang terjadi yakni :

$$S_{Losses} = S_{incoming} - S_{outgoing} = 22,56 - 21,2 = 1,36 \text{ MVA}$$

Losses ini diakibatkan karena adanya rugi-rugi yang ada pada transformator seperti rugi tembaga dan rugi inti. Namun semua rugi-rugi tersebut tidak sampai mengganggu aliran suplai daya ke beban.

4.4 Analisis Starting Motor

Analisis *starting motor* ini digunakan untuk mengetahui drop tegangan yang terjadi pada setiap bus saat salah satu motor mengalami *start* motor [11]. Dalam hal ini akan dianalisis beban motor terbesar yang berada di setiap unit. Untuk unit 1 beban motor terbesar yakni motor BFP-1B, sedangkan untuk unit 2 motor terbesar yakni motor BFP-2A. Kedua motor di *setting* untuk *starting motor* pada detik ke 2. Berikut spesifikasi untuk masing-masing motor yang digunakan pada Tabel 4.9.

Tabel 4.9 Spesifikasi Motor BFP-1B dan BFP-2A

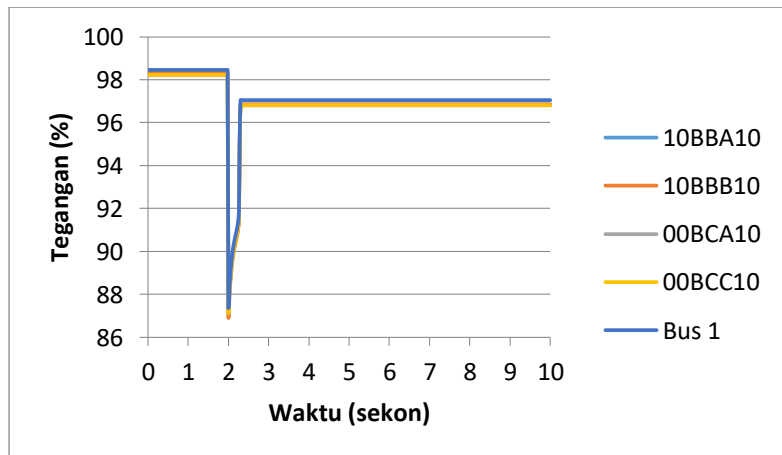
Nama	BFP-1B	BFP-2A
Rating Daya	3300 kW	3300 kW
Rating Tegangan	6,3 kV	6,3 kV
Rating Faktor Daya	85,3%	85,3%
Full Load Ampere	354,1 A	354,1 A
Locked Rotor Current	625,4% dari FLA	625,4% dari FLA

4.4.1 Analisis *Starting Motor* saat Unit 1 disuplai oleh Grid melewati Transformator SST

Setelah disimulasikan didapatkan hasil tegangan pada masing-masing bus unit 1 pada Tabel 4.10 dengan grafik seperti pada Gambar 4.8.

Tabel 4.10 Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 1

Observasi	Tegangan (%)				
	10BBA10	10BBB10	00BCA10	00BCC10	Bus 1
<i>Min</i>	87.11	86.90	87.11	87.11	87.37
<i>Max</i>	98.22	98.33	98.22	98.22	98.46
<i>Initial</i>	98.22	98.33	98.22	98.22	98.46
<i>Steady</i>	96.81	96.86	96.81	96.81	97.05



Gambar 4.8 Grafik Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 1

Dari hasil yang didapat dari Tabel 4.10 serta grafik Gambar 4.8, drop tegangan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Berdasarkan standar IEEE 1159-1995, hasil diatas tergolong dalam *normal voltage* dikarenakan tegangan pada setiap bus drop tidak melebihi batas bawah saat terjadinya *starting* pada motor BFP-1B. Tegangan terendah berada pada 86,90% tegangan nominalnya yakni pada bus 10BBB10 dengan

selang waktu hanya 0,14 sekon hingga kembali ke tegangan diatas 90%. Oleh karena itu jika terdapat salah satu beban *starting* saat suplai beban semua dari transformator SST, semua bus akan berada pada level tegangan yang normal. Jika dihitung, selisih tegangan terbesar pada saat sebelum dan sesudah adanya motor yakni pada Bus 10BBB10 dengan nilai sebagai berikut :

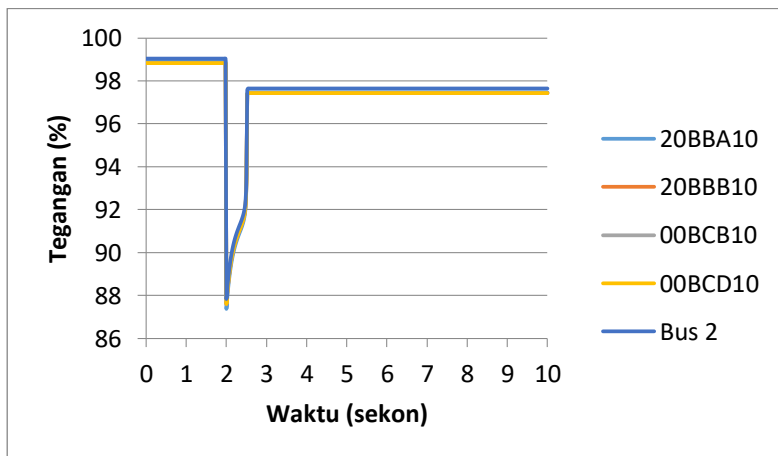
$$V_{drop} = |V_{awal}| - |V_{akhir}| = 98,33 - 96,86 = 1,47\%$$

4.4.2 Analisis *Starting Motor* saat Unit 2 disuplai oleh Grid melewati Transformator SST

Setelah disimulasikan didapatkan hasil tegangan pada masing-masing bus unit 2 pada Tabel 4.11 dengan grafik seperti pada Gambar 4.9.

Tabel 4.11 Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 2

Observasi	Tegangan (%)				
	20BBA10	20BBB10	00BCB10	00BCD10	Bus 2
<i>Min</i>	87.38	87.61	87.61	87.61	87.84
<i>Max</i>	98.92	98.83	98.83	98.83	99.04
<i>Initial</i>	98.92	98.83	98.83	98.83	99.04
<i>Steady</i>	97.46	97.43	97.43	97.43	97.65



Gambar 4.9 Grafik Level Tegangan pada Masing-Masing Bus di Unit 2

Dari hasil yang didapat dari Tabel 4.11 serta grafik Gambar 4.9, kedip tegangan yang terjadi tidak terlalu signifikan. Berdasarkan standar IEEE 1159-1995, hasil diatas tergolong dalam *normal voltage* dikarenakan tegangan pada setiap bus tidak melebihi batas bawah saat terjadinya *starting* pada motor BFP-2A. Tegangan terendah berada pada 87,38% tegangan nominalnya yakni pada bus 20BBA10 dengan selang waktu hanya 0,18 sekon hingga kembali ke tegangan diatas 90%. Oleh karena itu jika terdapat salah satu beban *starting* saat suplai beban semua dari transformator SST, semua bus akan berada pada level tegangan yang normal. Jika dihitung, selisih tegangan terbesar pada saat sebelum dan sesudah adanya motor yakni pada Bus 20BBA10 dengan nilai sebagai berikut :

$$V_{drop} = |V_{awal}| - |V_{akhir}| = 98,92 - 97,46 = 1,46\%$$

4.5 Analisis Hubung Singkat

Analisis hubung singkat ini digunakan untuk mengetahui nilai arus hubung singkat pada setiap bus atau peralatan yang diperlukan dalam proses *setting* rele pengaman arus lebih gangguan fasa. Untuk keperluan analisis arus gangguan hubung singkat dibutuhkan dua parameter, yakni arus gangguan hubung singkat maksimum dan arus gangguan hubung singkat minimum. Arus gangguan hubung singkat maksimum yang dianalisa adalah hubung singkat 3 fasa saat 4 *cycle* dan saat 30 *cycle*. Sedangkan untuk arus gangguan hubung singkat minimum yang dianalisa ialah hubung singkat 2 fasa (*line to line*) saat 30 *cycle*.

Dalam analisis hubung singkat ini data yang telah didapat merupakan data saat transformator UAT 1 dalam keadaan mati sehingga beban-beban di bawah transformator UAT 1 disuplai oleh transformator SST yang akan dipasang. Serta data saat transformator UAT 2 dalam keadaan mati sehingga beban-beban di bawah transformator UAT 2 disuplai oleh transformator SST yang akan dipasang.

4.5.1 Analisis Hubung Singkat Maksimum

Arus hubung singkat maksimum adalah nilai arushubung singkat saat terjadi hubung singkat pada ketiga fasanya ketika pembangkitan maksimum. Pada tugas akhir ini dibutuhkan data arus gangguan hubung singkat maksimum saat 4 *cycle* dan saat 30 *cycle*. Arus hubung singkat maksimum 4 *cycle* digunakan untuk keperluan perhitungan *time dial* pada kurva invers saat rele arus lebih bekerja mendekati 4 *cycle* (0,08 sekon). Sedangkan arus hubung singkat maksimum 30 *cycle* digunakan

untuk perhitungan *time dial* pada kurva invers saat rele arus lebih bekerja pada waktu lebih dari 0,1 sekon. Pada fase 4 *cycle* hingga 30 *cycle*, motor masih menyumbang arus kontribusi ke titik dimana terjadi gangguan. Namun pada saat fase lebih dari 30 *cycle* motor sudah tidak menyumbang arus kontribusi sehingga arus hubung singkat murni dari sisi pembangkitan. Berikut data nilai arus hubung singkat maksimum 4 *cycle* pada bus utama yang ditunjukkan pada Tabel 4.12 saat transformator UAT 1 mati dan Tabel 4.13 saat transformator UAT 2 mati. Untuk data nilai arus hubung singkat maksimum 30 *cycle* pada bus utama ditunjukkan pada Tabel 4.14 saat transformator UAT 1 mati dan Tabel 4.15 saat transformator UAT 2 mati.

Tabel 4.12 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 4 *cycle* saat Transformator UAT 1 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 3 fasa 4 <i>cycle</i>
1	Bus 10BBA10	6,3 kV	24,39 kA
2	Bus 10BBB10	6,3 kV	24,38 kA
3	Bus 00BCA10	6,3 kV	24,39 kA
4	Bus 00BCC10	6,3 kV	24,39 kA
5	Bus 1	6,3 kV	25,04 kA

Tabel 4.13 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 4 *cycle* saat Transformator UAT 2 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 3 fasa 4 <i>cycle</i>
1	Bus 20BBA10	6,3 kV	24,07 kA
2	Bus 20BBB10	6,3 kV	24,06 kA
3	Bus 00BCB10	6,3 kV	24,06 kA
4	Bus 00BCD10	6,3 kV	24,06 kA
5	Bus 2	6,3 kV	24,71 kA

Tabel 4.14 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 30 *cycle* saat Transformator UAT 1 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 3 fasa 30 <i>cycle</i>
1	Bus 10BBA10	6,3 kV	16,82 kA
2	Bus 10BBB10	6,3 kV	16,82 kA
3	Bus 00BCA10	6,3 kV	16,82 kA

Tabel 4.14 (Lanjutan) Data Arus Hubung Singkat Maksimum 30 *cycle* saat Transformator UAT 1 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 3 fasa 30 <i>cycle</i>
4	Bus 00BCC10	6,3 kV	16,82 kA
5	Bus 1	6,3 kV	17,28 kA

Tabel 4.15 Data Arus Hubung Singkat Maksimum 30 *cycle* saat Transformator UAT 2 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 3 fasa 30 <i>cycle</i>
1	Bus 20BBA10	6,3 kV	16,82 kA
2	Bus 20BBB10	6,3 kV	16,82 kA
3	Bus 00BCB10	6,3 kV	16,82 kA
4	Bus 00BCD10	6,3 kV	16,82 kA
5	Bus 2	6,3 kV	17,28 kA

4.5.2 Analisis Hubung Singkat Minimum

Arus hubung singkat minimum adalah nilai arus hubung singkat saat terjadi hubung singkat pada kedua fasanya ketika pembangkitan minimum atau pada kondisi *steady state* (30 *cycle*). Nilai arus hubung singkat minimum ini digunakan sebagai batasan nilai *pick up* pada kurva waktu instan. Data arus hubung singkat minimum 30 *cycle* pada bus utama ditunjukkan pada Tabel 4.16 saat transformator UAT 1 mati dan Tabel 4.17 saat transformator UAT 2 mati.

Tabel 4.16 Data Arus Hubung Singkat Minimum 30 *cycle* saat Transformator UAT 1 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 2 fasa 30 <i>cycle</i>
1	Bus 10BBA10	6,3 kV	14,57 kA
2	Bus 10BBB10	6,3 kV	14,57 kA
3	Bus 00BCA10	6,3 kV	14,57 kA
4	Bus 00BCC10	6,3 kV	14,57 kA
5	Bus 1	6,3 kV	14,96 kA

Tabel 4.17 Data Arus Hubung Singkat Minimum 30 *cycle* saat Transformator UAT 2 *off*

No	ID Bus	Tegangan	Arus Hubung Singkat 2 fasa 30 <i>cycle</i>
1	Bus 20BBA10	6,3 kV	14,57 kA
2	Bus 20BBB10	6,3 kV	14,57 kA
3	Bus 00BCB10	6,3 kV	14,57 kA
4	Bus 00BCD10	6,3 kV	14,57 kA
5	Bus 2	6,3 kV	14,96 kA

4.6 Perancangan Sistem Koordinasi Proteksi

Perancangan sistem proteksi ini perlu dilakukan karena terdapat perubahan setting pada sistem kelistrikan eksisting dengan adanya penambahan transformator SST ini. Oleh karena itu diperlukan resetting pada masing-masing rele eksisting serta melakukan setting pada rele rele baru khususnya rele rele di bawah transformator SST hingga bus utama eksisting yang terinterkoneksi dengan bus di bawah transformator UAT seperti bus 10BBA10, bus 10BBB10, bus 20BBA10, dan bus 20BBB10.

Pada perancangan sistem koordinasi proteksi ini dipilih beberapa jenis tipikal yang berguna untuk mewakili setting rele koordinasi proteksi yang sejenis. Sejenis dalam hal ini level *grading time* sama.

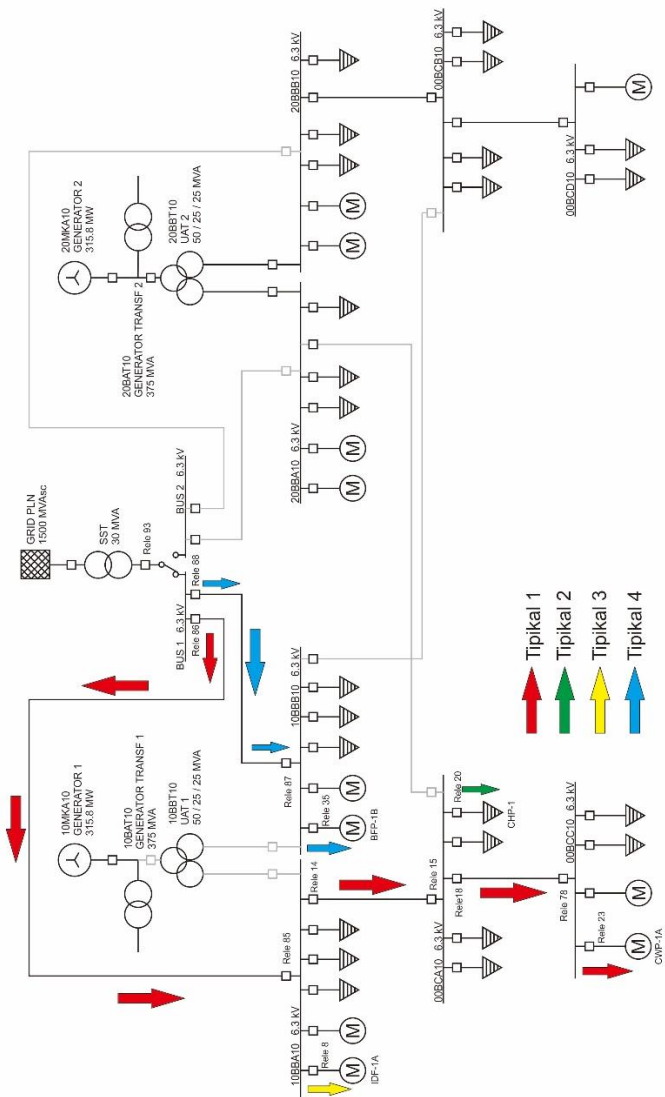
4.6.1 Pemilihan Tipikal Koordinasi pada PLTU Rembang

Untuk memudahkan dalam proses perancangan sistem proteksi setting rele pada PLTU Rembang, dipilih 4 jenis tipikal untuk dilakukan koordinasi rele gangguan fasa. Tipikal yang digunakan dalam koordinasi rele gangguan fasa meliputi tipikal pada sistem kelistrikan baru (saat tersambung transformator SST) dan tipikal yang mewakili jaringan *existing* yang terhubung dengan sistem kelistrikan baru tersebut. Berikut penjelasan untuk masing-masing tipikal.

1. Tipikal 1 : Koordinasi rele arus lebih fasa dari sisi sekunder transformator SST yang berada pada Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban CWP-1A yang merupakan beban terbesar pada Bus 00BCC10 6,3 kV. Rele yang akan disetting pada tipikal 1 ini adalah rele 23, rele 78, rele 18, rele 15, rele 14, rele 85, rele 86, dan rele 93.
2. Tipikal 2 : Koordinasi rele arus lebih fasa pada beban CHP-1 yang merupakan beban terbesar pada Bus 00BCA10 6,3kV. Rele yang akan disetting pada tipikal 2 ini adalah rele 20.

3. Tipikal 3 : Koordinasi rele arus lebih fasa pada beban IDF-1A yang merupakan beban terbesar pada Bus 10BBA10 6,3 kV. Rele yang akan disetting pada tipikal 3 ini adalah rele 8.
4. Tipikal 4 : Koordinasi rele arus lebih fasa dari Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban BFP-1B yang merupakan beban terbesar pada Bus 10BBB10 6,3 kV. Rele yang akan disetting pada tipikal 4 ini adalah rele 35, rele 87, dan rele 88.

Untuk lebih jelasnya berikut ilustrasi untuk berbagai tipikal pada Gambar 4.10.



Gambar 4.10 Tipikal Koordinasi Rele Arus Lebih Fasa PLTU Rembang

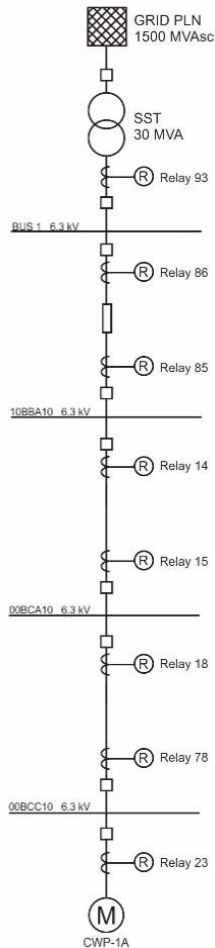
4.6.2 Koordinasi Rele Arus Lebih

Koordinasi rele arus lebih gangguan fasa penting adanya agar terhindar dari terjadinya gangguan arus lebih berupa gangguan beban lebih (*overload*) dan gangguan hubung singkat (*short circuit*). Untuk proses koordinasi rele arus lebih ini diperlukan beberapa perhitungan parameter yakni arus *pick up* untuk sisi *low set* dan *time dial* untuk kurva *overcurrent*, serta arus *pick up* untuk sisi *high set* dan *time delay* untuk kurva *instantaneous*. Untuk *time delay* berdasarkan standard IEEE 242, selisih waktu kerja antara rele primer dan rele backupnya (*grading time*) adalah 0,2 hingga 0,3 detik.

Setelah dimasukkan semua parameter pada rele sehingga rele telah disetting menurut perhitungan, dilakukan plot TCC (*Time Current Curve*) untuk melihat kinerja antar kurva semua rele pada satu tipikal. Plot ini dilakukan dengan menggunakan mode *Star – Protective Device Coordination* pada software ETAP 12.6.0.

4.6.2.1 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 1

Pada tipikal 1, koordinasi proteksi yang dilakukan dari sisi sekunder transformator SST yang berada pada Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban CWP-1A yang merupakan beban terbesar pada Bus 00BCC10 6,3 kV. Berikut gambar rangkaian tipikal 1 pada Gambar 4.11.



Gambar 4.11 *Single Line Diagram Tipikal 1*

Dari Gambar 4.10 dapat dilihat jika antara rele 86 dan rele 85 merupakan saluran penghubung atau kabel, sehingga *setting* kedua rele tersebut dapat dibuat identik. Seperti halnya untuk rele 14 dengan rele 15 serta rele 18 dan rele 78.

Berikut perhitungan parameter parameter yang diperlukan untuk *setting* masing-masing rele pada tipikal 1.

a. Rele 23

Manufacturer : Merlin Gerin
 Model : Sepam 40
 Curve Type : IEC - *Extremely Inverse*
 FLA Beban CWP-1A : 225.3 A
 Isc max 4 cycle : 24,39 kA
 Isc min 30 cycle : 14,57 kA
 CT Ratio : 300 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Beban CWP-1A} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Beban CWP-1A}$$

$$1,05 \times 225,3 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 225,3$$

$$236,57 < I \text{ pick up} < 315,42$$

$$\frac{236,57}{300} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{315,42}{300} \text{ In}$$

$$0,79 \text{ In} < \text{Tap} < 1,05 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

$I \text{ pick up} = 300 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,1 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{24390}{300}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 6,68$$

Time dial set = 7 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Beban CWP-1A} < I \text{ set} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir di Rele 23}$$

$$1,6 \times 225,3 < I \text{ set} < 0,8 \times 14570$$

$$360,48 < I_{set} < 11656$$

$$\frac{360,48}{300} I_n < Tap < \frac{11656}{300} I_n$$

$$1,2016 I_n < Tap < 38,85 I_n$$

(range : 0,1 In sampai 24 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 20 In

I set = 6000 A

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,1 s

b. Rele 78

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban Total pada Bus 00BCC10 : 668,52 A

Isc max 30 cycle : 16,82 kA

Isc min 30 cycle : 14,57 kA

CT Ratio : 800 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Bus 00BCC10} < I_{pick up} < 1,4 \times \text{FLA Bus 00BCC10}$$

$$1,05 \times 668,52 < I_{pick up} < 1,4 \times 668,52$$

$$722,946 < I_{pick up} < 963,928$$

$$\frac{722,946}{800} I_n < Tap < \frac{963,928}{800} I_n$$

$$0,9037 I_n < Tap < 1,204 I_n$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1,1 In

I pick up = 880 A

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,3 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc max}}{I_{pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}} \right)^2 - 1 \right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{16820}{880} \right)^2 - 1 \right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 1,1$$

Time dial set = 8 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

1,6 x FLA Bus 00BCC10 < I set < 0,8 x Isc min mengalir pada Rele 78

1,6 x 668,52 < I set < 0,8 x 14570

1069,64 < I set < 11656

$\frac{1069,64}{800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{800} \text{ In}$

1,3371 In < Tap < 14,57 In

(range : 0,1 In sampai 24 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 8,8 In

I set = 7040 A

Time Delay

Dipilih time delay = 0,3 s

c. Rele 18

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - Extremely Inverse

FLA Beban Total pada Bus 00BCC10

: 668,52 A

Isc max 30 cycle

: 16,82 kA

Isc min 30 cycle

: 14,57 kA

CT Ratio

: 800 : 5

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA Bus 00BCC10 < I pick up < 1,4 x FLA Bus 00BCC10

1,05 x 668,52 < I pick up < 1,4 x 668,52

722,946 < I pick up < 963,928

$\frac{722,946}{800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{963,928}{800} \text{ In}$

0,9037 In < Tap < 1,204 In

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1,1 In

$I_{pick\ up} = 880\text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,3 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc\ max}}{I_{pick\ up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$
$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{I_{sc\ max}}{I_{pick\ up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$
$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{16820}{880}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$
$$T = 1,1$$

Time dial set = 8 (dengan *step* 0,1)

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA Bus 00BCC10} < I_{set} < 0,8 \times I_{sc\ min}$ mengalir pada Rele 18

$1,6 \times 668,52 < I_{set} < 0,8 \times 14570$

$1069,64 < I_{set} < 11656$

$\frac{1069,64}{800}\text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{800}\text{ In}$

$1,3371\text{ In} < \text{Tap} < 14,57\text{ In}$

(*range* : 0,1 In sampai 24 In, dengan *step* 0,1 In)

Dipilih tap = 8,8 In

$I_{set} = 7040\text{ A}$

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,3 s

d. Rele 15

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban Total pada Bus 00BCA10

: 1489 A

$I_{sc\ max\ 30\ cycle}$

: 16,82 kA

Isc min 30 cycle : 14,57 kA
 CT Ratio : 1800 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Bus 00BCA10} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Bus 00BCA10}$$

$$1,05 \times 1489 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 1489$$

$$1563,45 < I \text{ pick up} < 2084,6$$

$$\frac{1563,45}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{2084,6}{1800} \text{ In}$$

$$0,87 \text{ In} < \text{Tap} < 1,158 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

$I \text{ pick up} = 1800 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,5 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,5 \times \left(\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,5 \times \left(\left(\frac{16820}{1800}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,436$$

Time dial set = 9 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Bus 00BCA10} < I \text{ set} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir pada Rele 15}$$

$$1,6 \times 1489 < I \text{ set} < 0,8 \times 14570$$

$$2382,4 < I \text{ set} < 11656$$

$$\frac{2382,4}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{1800} \text{ In}$$

$$1,324 \text{ In} < \text{Tap} < 6,47 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 4,5 In

$I \text{ set} = 8100 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,5 s

e. Rele 14

<i>Manufacturer</i>	: Merlin Gerin
<i>Model</i>	: Sepam 40
<i>Curve Type</i>	: IEC - <i>Extremely Inverse</i>
FLA Beban Total pada Bus 00BCA10	: 1489 A
Isc max 30 cycle	: 16,82 kA
Isc min 30 cycle	: 14,57 kA
CT Ratio	: 1800 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Bus 00BCA10} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Bus 00BCA10}$$

$$1,05 \times 1489 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 1489$$

$$1563,45 < I \text{ pick up} < 2084,6$$

$$\frac{1563,45}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{2084,6}{1800} \text{ In}$$

$$0,87 \text{ In} < \text{Tap} < 1,158 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan *step* 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

$I \text{ pick up}$ = 1800 A

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,5 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,5 \times \left(\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,5 \times \left(\left(\frac{16820}{1800}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$
$$T = 0,436$$

Time dial set = 9 (dengan *step* 0,1)

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA Bus 00BCA10} < I_{\text{set}} < 0,8 \times I_{\text{sc min mengalir pada Rele 14}}$

$$1,6 \times 1489 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 14570$$

$$2382,4 < I_{\text{set}} < 11656$$

$$\frac{2382,4}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{1800} \text{ In}$$

$$1,324 \text{ In} < \text{Tap} < 6,47 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 4,5 In

$I_{\text{set}} = 8100 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,5 s

f. Rele 85

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban Total pada Bus 10BBA10 : 2679,39 A

$I_{\text{sc max 30 cycle}}$

: 16,82 kA

$I_{\text{sc min 30 cycle}}$

: 14,57 kA

CT Ratio

: 3000 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Bus 10BBA10} < I_{\text{pick up}} < 1,4 \times \text{FLA Bus 10BBA10}$$

$$1,05 \times 2679,39 < I_{\text{pick up}} < 1,4 \times 2679,39$$

$$2813,36 < I_{\text{pick up}} < 3751,14$$

$$\frac{2813,36}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{3751,14}{3000} \text{ In}$$

$$0,938 \text{ In} < \text{Tap} < 1,25 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

$I_{\text{pick up}} = 3000 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,7 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,7 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,7 \times \left(\left(\frac{16820}{3000}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,215$$

Time dial set = 10 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

1,6 x FLA Bus 10BBA10 < I set < 0,8 x I_{sc} min mengalir pada Rele 85

1,6 x 2679,39 < I set < 0,8 x 14570

4287,1 < I set < 11656

$\frac{4287,1}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{3000} \text{ In}$

1,43 In < Tap < 3,88 In

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 3,3 In

I set = 9900 A

Time Delay

Dipilih time delay = 0,7 s

g. Rele 86

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban pada Bus 10BBA10

: 2679,39 A

I_{sc} max 30 cycle

: 16,82 kA

I_{sc} min 30 cycle

: 14,57 kA

CT Ratio

: 3000 : 5

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA Bus 10BBA10 < I pick up < 1,4 x FLA Bus 10BBA10

1,05 x 2679,39 < I pick up < 1,4 x 14570

2813,36 < I pick up < 11656

$$\frac{2813,36}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{3000} \text{ In}$$

$$0,938 \text{ In} < \text{Tap} < 3,88 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

I pick up = 3000 A

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,7 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,7 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,7 \times \left(\left(\frac{16820}{3000}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,215$$

Time dial set = 10 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

1,6 x FLA Bus 10BBA10 < I set < 0,8 x Isc min mengalir pada Rele 85

1,6 x 2679,39 < I set < 0,8 x 14570

4287,1 < I set < 11656

$$\frac{4287,1}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{3000} \text{ In}$$

1,43 In < Tap < 3,88 In

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 3,3 In

I set = 9900 A

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,7 s

h. Rele 93

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

<i>Curve Type</i>	: IEC - <i>Extremely Inverse</i>
FLA Sekunder Trafo SST	: 2624 A
Isc max 30 cycle	: 17,82 kA
Isc min 30 cycle	: 14,96 kA
CT Ratio	: 3000 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Sek Trafo SST} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA SekTrafo SST}$$

$$1,05 \times 2624 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 2624$$

$$2755,2 < I \text{ pick up} < 3673,6$$

$$\frac{2755,2}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{3673,6}{3000} \text{ In}$$

$$0,919 \text{ In} < \text{Tap} < 1,224 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1.1 In

$I \text{ pick up} = 3300 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,9 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,9 \times \left(\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,9 \times \left(\left(\frac{17820}{3300}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,25$$

Time dial set = 11 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA SekTrafo SST} < I \text{ set} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir pada Rele 93}$$

$$1,6 \times 2624 < I \text{ set} < 0,8 \times 14960$$

$$4198,4 < I \text{ set} < 11968$$

$$\frac{4198,4}{3000} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11968}{3000} \text{ In}$$

$$1,4 \text{ In} < \text{Tap} < 3,98 \text{ In}$$

(*range* : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

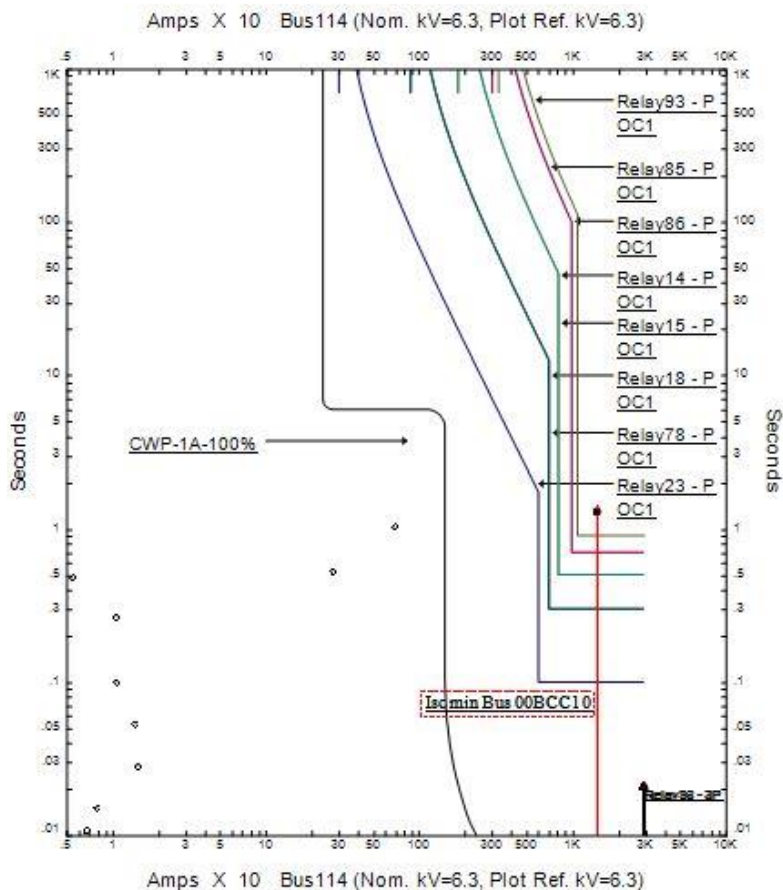
Dipilih tap = 3,6 In

I set = 10800 A

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,9 s

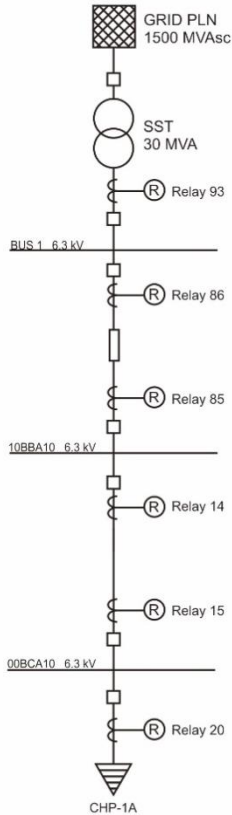
Setelah didapatkan parameter parameter yang dibutuhkan langkah selanjutnya memasukkan semua parameter-parameter tersebut ke dalam setiing rele. Setelah dimasukkan didapatkan plot TCC untuk melihat hasil perhitungan dan setting koordinasi apakah sudah sesuai atau tidak. Berikut plot TCC untuk tipikal 1 pada Gambar 4.12.



Gambar 4.12 Plot TCC Tipikal 1

4.6.2.2 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 2

Untuk tipikal 2 koordinasi pengaman sisi sekunder transformator SST yang berada pada Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban CHP-1. Gambar rangkaian tipikal 2 ditunjukkan pada Gambar 4.13.



Gambar 4.13 *Single Line Diagram* Tipikal 2

Untuk perhitungan rele selain rele 20 telah disetting menurut perhitungan parameter di tipikal sebelumnya, sehingga tidak perlu untuk menghitung maupun *setting* lagi.

Berikut perhitungan parameter yang diperlukan untuk *setting* rele pada tipikal 2.

Rele 20

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 40
Curve Type : IEC - *Extremely Inverse*
 FLA Beban CHP-1 : 328 A

Isc max 4 cycle : 24,39 kA
 Isc min 30 cycle : 14,57 kA
 CT Ratio : 500 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Beban CHP-1} < I_{\text{pick up}} < 1,4 \times \text{FLA Beban CHP-1}$$

$$1,05 \times 328 < I_{\text{pick up}} < 1,4 \times 328$$

$$344,4 < I_{\text{pick up}} < 459,2$$

$$\frac{344,4}{500} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{459,2}{500} \text{ In}$$

$$0,6888 \text{ In} < \text{Tap} < 0,9184 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 0,8 In

$I_{\text{pick up}} = 400 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,1 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{I_{\text{pick up}}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{I_{\text{sc max}}}{I_{\text{pick up}}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{24390}{400}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 3,75$$

Time dial set = 8 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Beban CHP-1} < I_{\text{set}} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir pada Rele 20}$$

$$1,6 \times 328 < I_{\text{set}} < 0,8 \times 14570$$

$$524,8 < I_{\text{set}} < 11656$$

$$\frac{524,8}{500} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{500} \text{ In}$$

$$1,05 \text{ In} < \text{Tap} < 23,31 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 24 In, dengan step 0,1 In)

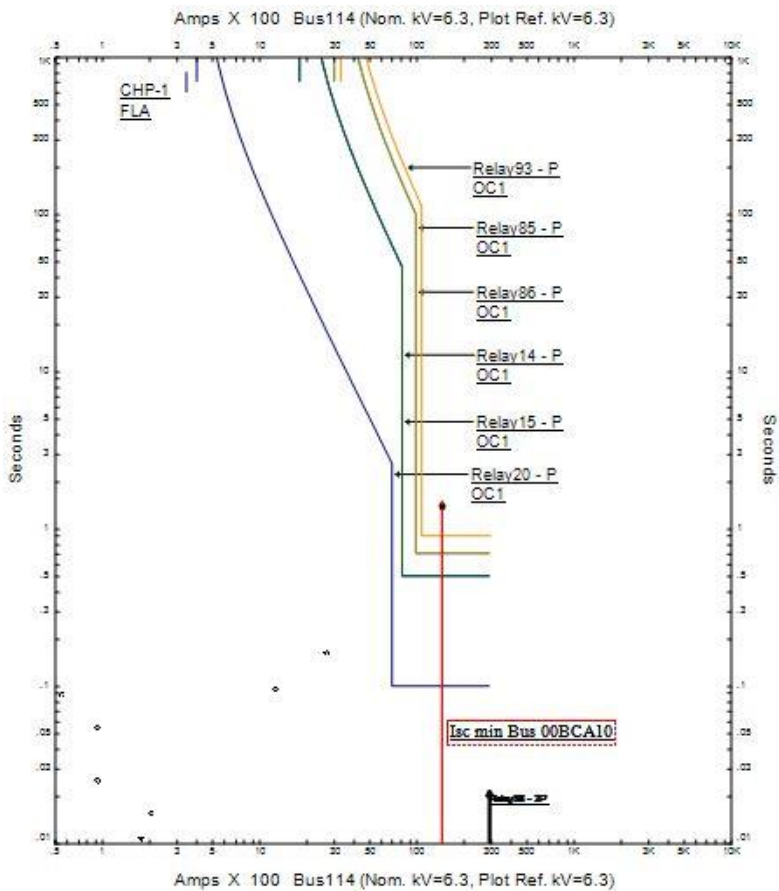
Dipilih tap = 14 In

$I_{set} = 7000 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,1 s

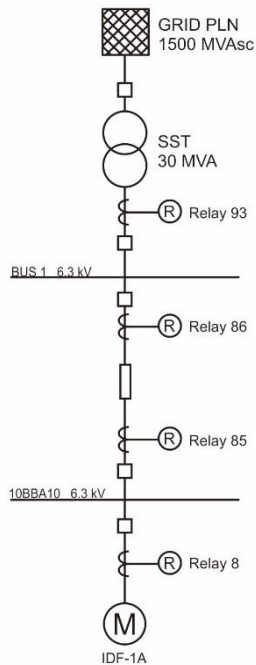
Berikut plot TCC untuk hasil perhitungan dan setting koordinasi proteksi tipikal 2 pada Gambar 4.14.



Gambar 4.14 Plot TCC Tipikal 2

4.6.2.3 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 3

Untuk tipikal 3 koordinasi pengaman sisi sekunder transformator SST yang berada pada Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban IDF-1A. Gambar rangkaian tipikal 3 ditunjukkan pada Gambar 4.15.



Gambar 4.15 *Single Line Diagram* Tipikal 3

Untuk perhitungan rele selain rele 8 telah disetting menurut perhitungan parameter di tipikal sebelumnya, sehingga tidak perlu untuk menghitung maupun *setting* lagi.

Berikut perhitungan parameter yang diperlukan untuk *setting* rele pada tipikal 3.

Rele 8

Manufacturer : Merlin Gerin

Model : Sepam 40

Curve Type : IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban IDF-1A : 230,7 A

Isc max 4 cycle : 24,39 kA
 Isc min 30 cycle : 14,57 kA
 CT Ratio : 300 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Beban IDF-1A} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Beban IDF-1A}$$

$$1,05 \times 230,7 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 230,7$$

$$242,235 < I \text{ pick up} < 322,98$$

$$\frac{242,235}{300} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{322,98}{300} \text{ In}$$

$$0,801 \text{ In} < \text{Tap} < 1,076 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

$I \text{ pick up} = 300 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,1 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{24390}{300}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 6,67$$

Time dial set = 9 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Beban IDF-1A} < I \text{ set} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir pada Rele 8}$$

$$1,6 \times 230,7 < I \text{ set} < 0,8 \times 14570$$

$$369,12 < I \text{ set} < 11656$$

$$\frac{369,12}{300} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{300} \text{ In}$$

$$1,231 \text{ In} < \text{Tap} < 38,85 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 24 In, dengan step 0,1 In)

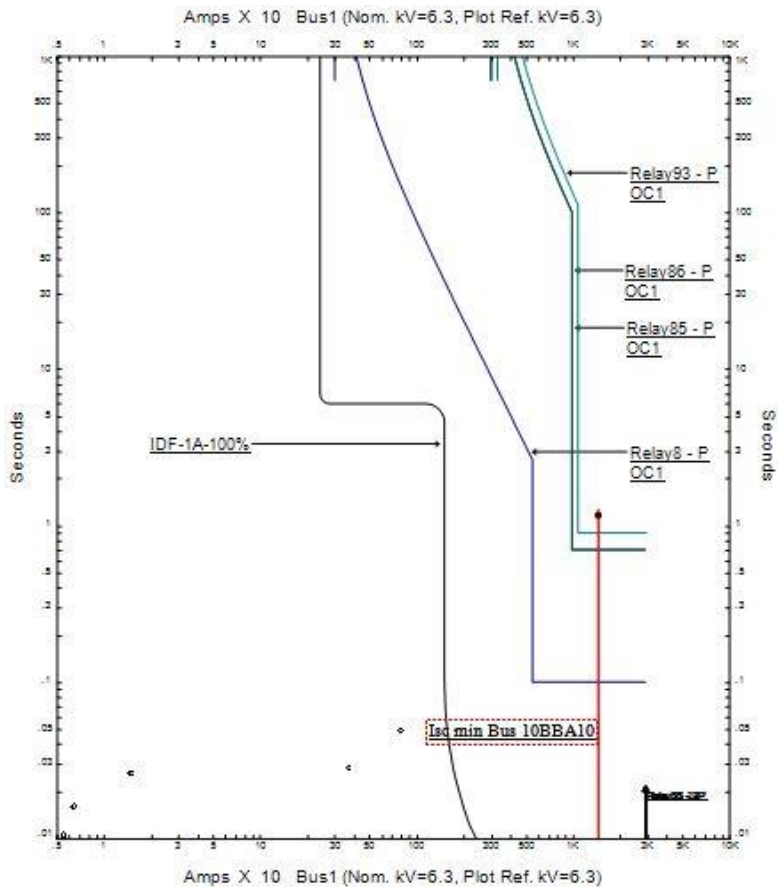
Dipilih tap = 18,4 In

I set = 5520 A

Time Delay

Dipilih time delay = 0,1 s

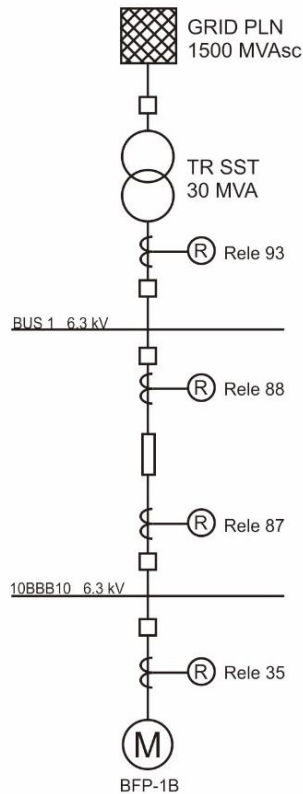
Berikut plot TCC untuk hasil perhitungan dan setting koordinasi proteksi tipikal 3 pada Gambar 4.16.



Gambar 4.16 Plot TCC Tipikal 3

4.6.2.4 Koordinasi Rele Arus Lebih Tipikal 4

Untuk tipikal 4 koordinasi pengaman sisi sekunder transformator SST yang berada pada Bus 1 6,3 kV sistem baru sampai dengan beban BFP-1B. Gambar rangkaian tipikal 4 ditunjukkan pada Gambar 4.17.



Gambar 4.17 Single Line Diagram Tipikal 4

Dari Gambar 4.16 dapat dilihat jika antara rele 87 dan rele 88 merupakan saluran penghubung atau kabel, sehingga *setting* kedua rele tersebut dapat dibuat identik.

Berikut perhitungan parameter parameter yang diperlukan untuk *setting* masing-masing rele pada tipikal 4.

a. Rele 35

Manufacturer : Merlin Gerin
Model : Sepam 40
Curve Type : IEC - *Extremely Inverse*
 FLA Beban BFP-1B : 354,1 A
 Isc max 4 cycle : 24,38 kA
 Isc min 30 cycle : 14,57 kA
 CT Ratio : 500 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Beban BFP-1B} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Beban BFP-1B}$$

$$1,05 \times 354,1 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 354,1$$

$$371,81 < I \text{ pick up} < 495,74$$

$$\frac{371,81}{500} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{495,74}{500} \text{ In}$$

$$0,744 \text{ In} < \text{Tap} < 0,991 \text{ In}$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 0,8 In

$I \text{ pick up} = 400 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,1 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{Isc \text{ max}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,1 \times \left(\left(\frac{24380}{400}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 3,75$$

Time dial set = 9 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

$$1,6 \times \text{FLA Beban BFP-1B} < I \text{ set} < 0,8 \times \text{Isc min mengalir pada Rele 35}$$

$$1,6 \times 354,1 < I \text{ set} < 0,8 \times 14570$$

$$566,56 < I \text{ set} < 11656$$

$$\frac{566,56}{500} I_n < \text{Tap} < \frac{11656}{500} I_n$$

$$1,134 I_n < \text{Tap} < 23,31 I_n$$

(range : 0,1 In sampai 24 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 16 In

I set = 8000 A

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,1 s

b. Rele 87

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban pada Bus 10BBB10

: 1595,3 A

Isc max 30 cycle

: 16,82 kA

Isc min 30 cycle

: 14,57 kA

CT Ratio

: 1800 : 5

Time Overcurrent Pickup

$$1,05 \times \text{FLA Bus 10BBB10} < I \text{ pick up} < 1,4 \times \text{FLA Bus 10BBB10}$$

$$1,05 \times 1595,3 < I \text{ pick up} < 1,4 \times 1595,3$$

$$1675,1 < I \text{ pick up} < 2233,4$$

$$\frac{1675,1}{1800} I_n < \text{Tap} < \frac{2233,4}{1800} I_n$$

$$0,931 I_n < \text{Tap} < 1,24 I_n$$

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In

I pick up = 1800 A

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,3 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc \text{ max}}}{I \text{ pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick \ up}} \right)^2 - 1 \right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{16820}{1800} \right)^2 - 1 \right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,26$$

Time dial set = 10 (dengan step 0,1)

Instantaneous Pickup

1,6 x FLA Bus 10BBB10 < I set < 0,8 x Isc min mengalir pada Rele 87

1,6 x 1595,3 < I set < 0,8 x 14570

2552,48 < I set < 11656

$\frac{2552,48}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{1800} \text{ In}$

1,42 In < Tap < 6,47 In

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 5 In

I set = 9000 A

Time Delay

Dipilih time delay = 0,3 s

c. Rele 88

Manufacturer

: Merlin Gerin

Model

: Sepam 40

Curve Type

: IEC - *Extremely Inverse*

FLA Beban Total pada Bus 10BBB10

: 1595,3 A

Isc max 30 cycle

: 16,82 kA

Isc min 30 cycle

: 14,57 kA

CT Ratio

: 1800 : 5

Time Overcurrent Pickup

1,05 x FLA Bus 10BBB10 < I pick up < 1,4 x FLA Bus 10BBB10

1,05 x 1595,3 < I pick up < 1,4 x 1595,3

1675,1 < I pick up < 2233,4

$\frac{1675,1}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{2233,4}{1800} \text{ In}$

0,931 In < Tap < 1,24 In

(range : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan step 0,1 In)

Dipilih tap = 1 In
 $I_{pick up} = 1800 \text{ A}$

Time Dial

Waktu operasi (t) = 0,3 s

Menurut *Datasheet* rele Merlin Gerin Sepam 40, penentuan *time delay* dari tipe kurva IEC – *Extremely Inverse* dapat menggunakan rumus :

$$t_d = \frac{80}{\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick up}}\right)^2 - 1} \times \frac{T}{\beta}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{I_{sc \max}}{I_{pick up}}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = \frac{0,3 \times \left(\left(\frac{16820}{1800}\right)^2 - 1\right) \times 0,808}{80}$$

$$T = 0,26$$

Time dial set = 10 (dengan *step* 0,1)

Instantaneous Pickup

$1,6 \times \text{FLA Bus } 10\text{BBB}10 < I_{set} < 0,8 \times I_{sc \min}$ mengalir pada Rele 88

$1,6 \times 1595,3 < I_{set} < 0,8 \times 14570$

$2552,48 < I_{set} < 11656$

$\frac{2552,48}{1800} \text{ In} < \text{Tap} < \frac{11656}{1800} \text{ In}$

$1,42 \text{ In} < \text{Tap} < 6,47 \text{ In}$

(*range* : 0,1 In sampai 2,4 In, dengan *step* 0,1 In)

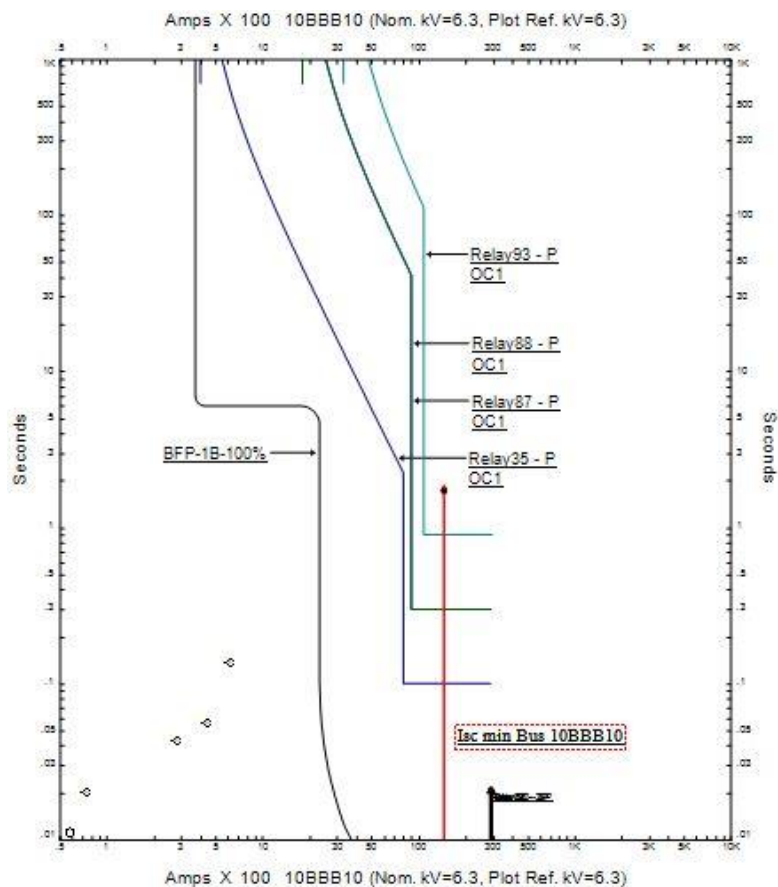
Dipilih tap = 5 In

$I_{set} = 9000 \text{ A}$

Time Delay

Dipilih *time delay* = 0,3 s

Berikut plot TCC untuk hasil perhitungan dan setting koordinasi proteksi tipikal 4 pada Gambar 4.18.



Gambar 4.18 Plot TCC Tipikal 4

BAB 5

KESIMPULAN DAN SARAN

5.1 Kesimpulan

Berdasarkan hasil simulasi dan analisis mengenai studi analisis penambahan transformator SST sebagai alternatif suplai unit bus bar pada sistem kelistrikan PLTU Rembang, dapat diambil kesimpulan sebagai berikut :

1. Hasil studi analisis *powerflow* menunjukkan bahwa penambahan transformator SST dengan kapasitas 30 MVA cukup untuk memenuhi kebutuhan beban pemakaian sendiri di masing-masing unit.
2. Hasil studi analisis *motor starting* menunjukkan bahwa dengan adanya *starting* motor pada beban terbesar menyebabkan drop tegangan sebesar 1,47% pada bus 10BBB10 saat transformator SST menyuplai unit 1 dan saat transformator SST menyuplai unit 2 1,46% pada bus 20BBA10.
3. Hasil perancangan koordinasi proteksi dengan 4 tipikal berhasil dirancang dengan menunjukkan hasil kurva TCC.
4. Dari segi kelistrikan, terdapat perubahan pada sistem kelistrikan eksisting dengan penambahan transformator SST namun tidak ada perubahan yang signifikan sehingga secara kelistrikan dapat dikatakan bahwa penambahan ini layak dilakukan.

5.2 Saran

Mengacu pada hasil studi analisis penambahan transformator SST pada sistem kelistrikan PLTU Rembang yang telah dilakukan, saran yang dapat menjadi masukan untuk menjaga kontinuitas suplai daya serta keandalan sistem adalah sebagai berikut :

1. Perlu adanya pemasangan HVCB pada sisi primer transformator UAT masing-masing unit agar saat transformator mengalami gangguan, cb tersebut membuka sehingga generator tidak mengalami gangguan untuk menyuplai daya ke transmisi melalui generator transformer.
2. Perlu adanya interlock antara cb di sekunder transformator UAT dengan cb interkoneksi bus utama dengan bus dibawah transformator SST.

3. Penambahan *cos (change over switch)* dibawah transformator SST berguna untuk *switch* antara bus 1 dan 2 sesuai kebutuhan.
4. Setting rele yang baru yakni rele yang terdapat pada sistem dibawah transformator SST dapat dijadikan pertimbangan serta referensi untuk melakukan setting yang sebenarnya.
5. Setting rele yang lama (eksisting) dapat digunakan sebagai perbandingan dan referensi bagi setting yang sebenarnya.

DAFTAR PUSTAKA

- [1] Gunawan, Hanapi, Ir.,Drs. 1993. *Mesin dan Rangkaian Listrik*. Jakarta: Penerbit Erlangga.
- [2] PT. PLN (Persero) Sektor Suralaya. 1996. *Buku Panduan Perencanaan Operasi dan Pemeliharaan*. Sektor Suralaya.
- [3] S. Hadi, Power System Analysis, WCB McGraw-Hill, 1999
- [4] IEEEstd. 1159-1995. “*IEEE Standard Voltage Dip*”. IEEE, New York.
- [5] Wahyudi, “*Diktat Kuliah Pengaman Sistem Tenaga Listrik*”, Teknik Elektro ITS, Surabaya, Bab 2, 2004.
- [6] Cahier Technique No. 158, “*Calculation of Short-circuit Currents*”. Schneider Electric, 2005.
- [7] Anderson, P.M, “*Power System Protection*”, John Wiley & Sons, Inc., Canada, Ch. 3, 1998.
- [8] Gers, Juan M., dan Holmes, Edward J., “*Protection of Electrical Distribution Network 2nd Edition*”, The Institution of Electrical Engineers, London, Ch. 5, 2004.
- [9] IEEE Std 242-2001™, “*IEEE Recommended Practice for Protection and Coordination of Industrial and Commercial Power Systems*”, The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., New York, Ch. 15, 2001.
- [10] Schneider Electric, 63230-216-219-B1, “*Sepam™ Series 40 Protective Relays User's Manual*. ”, 2007.
- [11] M. Abbas, M. A. Majeed, M. Kassas, and F. Ahmad, “*Motor starting study for a urea manufacturing plant*,” in Power Engineering, Energy and Electrical Drives (POWERENG), 2011 International Conference on, 2011, pp. 1–6.

---Halaman ini sengaja dikosongkan---

BIOGRAFI PENULIS



Charisna Fidiansyah Putra, dilahirkan di kota Malang pada tanggal 20 Mei 1996. Merupakan anak keempat dari empat bersaudara pasangan Budi Wahyu Priyono dan Erlina Mufidah. Penulis telah menempuh pendidikan selama 14 tahun (TK-SD-SMP-SMA) di kota Malang. Penulis memulai jenjang pendidikan di TK Hidayatul Muhtadi'in pada tahun 2000 – 2002, SD Negeri Kauman 1 pada tahun 2002 – 2008, SMP Negeri 3 Malang pada tahun 2008 – 2011, dan SMA Negeri 3 Malang 2011 – 2014 dan sejak 2014 menempuh pendidikan sebagai mahasiswa Departemen Teknik Elektro, bidang studi Teknik Sistem Tenaga, Fakultas Teknologi Elektro, Institut Teknologi Sepuluh Nopember, Surabaya. Penulis dapat dihubungi via email dengan alamat charisnafputra@gmail.com.